



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**ZONEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE  
MASSA, ENXURRADAS E INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE  
MARQUES DE SOUZA – RS**

Daniel Martins dos Santos

Lajeado, novembro de 2015

Daniel Martins dos Santos

**ZONEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE  
MASSA, ENXURRADAS E INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE  
MARQUES DE SOUZA – RS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Périco

Lajeado, novembro de 2015

Daniel Martins dos Santos

**ZONEAMENTO DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTO DE  
MASSA, ENXURRADAS E INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE  
MARQUES DE SOUZA – RS**

A banca examinadora abaixo aprova a monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira –  
Orientador          Centro          Universitário  
UNIVATES

Prof. Dr. Eduardo Périco – Coorientador  
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, novembro de 2015

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, por todo o apoio e esforço dedicados a minha educação durante todos estes anos.

Ao meu orientador, Guilherme Garcia de Oliveira e ao coorientador Eduardo Périco, pela dedicação em auxiliar a elaboração deste trabalho.

A minha namorada Tanara Schmidt, pela companhia e pela ajuda na redação deste trabalho.

A Prefeitura Municipal de Marques de Souza pelo fornecimento de dados do município que foram essenciais para elaboração do presente estudo, em especial ao Douglas Guilherme Scherer pela atenção e retorno aos e-mails enviados.

Ao senhor Ailton Lamm, responsável pela defesa civil do município, pelo fornecimento dos dados para elaboração do trabalho.



## RESUMO

O planejamento inadequado da maioria dos municípios faz com que a ocupação urbana e rural ocorra algumas vezes em áreas suscetíveis a eventos extremos da natureza, podendo ocasionar danos materiais ou até mesmo perdas de vidas humanas. A proposta do presente trabalho foi analisar as áreas suscetíveis a movimentos de massa, enxurradas e inundações no município de Marques de Souza, para a elaboração de um zoneamento de áreas com aptidão para habitação. Para alcançar os objetivos, o trabalho fundamentou-se em: i) pesquisas bibliográficas; ii) na modelagem hidrológica aplicada a eventos extremos de precipitação para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações, em diferentes tempos de retorno (TRs); iii) na obtenção de um inventário de movimentos de massa e espacialização de áreas suscetíveis a esses eventos; iv) no zoneamento de aptidão do uso do solo, através do cruzamento dos dois mapas de suscetibilidade. A aptidão do solo para habitação foi classificada em seis zonas. A primeira se refere aos locais sem suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, e as outras cinco com restrições ou condicionantes para a habitação. O resultado obtido com a modelagem hidrológica para as áreas de alta suscetibilidade (TR de 10 anos) é de uma área de inundação de 1.177,53 hectares, para média suscetibilidade (TR de 50 anos) é de 1.323,70 hectares e para baixa suscetibilidade (TR de 100 anos) é de 1.385,74 hectares, representando 9,39%, 10,55% e 11,05% da área total do município, respectivamente. A área com algum tipo de suscetibilidade aos movimentos de massa é de 9.291,60 hectares, equivalente a 74,10% da área total do município. Desses, 4.815,35 hectares são de baixa suscetibilidade, 2.044,70 hectares de média suscetibilidade e 2.431,54 hectares de alta suscetibilidade, representando 38,40%, 16,31% e 19,39%, respectivamente. As zonas sem suscetibilidade representam uma área de 2.083,28 hectares (16,60%), nesses locais são permitidos todos os tipos de usos do solo. As zonas de baixa e média suscetibilidade representam uma área de 6.891,49 hectares (54,93%), nesses locais são indicadas algumas condicionantes para habitação. A zona de alta suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, representa

uma área de 3.572,15 hectares (28,47%), nesses locais sugere-se que sejam evitadas novas construções. A metodologia adotada se mostrou eficiente e de baixo custo, apresentando resultados consistentes e coerentes com os objetivos propostos no trabalho. Este trabalho pode auxiliar o poder público na tomada de decisões, no planejamento e no desenvolvimento do município e na realização de um futuro estudo de áreas de risco para a área do município de Marques de Souza.

**Palavras-chave:** Eventos extremos. Desastres naturais. Geotecnologias. Modelagem hidrológica. Aptidão do uso do solo.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição dos desastres naturais no mundo, separados por continentes. ....	16
Figura 2: Número de desastres naturais relatados de 1900-2011, no mundo.....	17
Figura 3: Estimativa de prejuízos (US\$ bilhões) causados por desastres naturais 1900-2011, no mundo. ....	17
Figura 4: Percentual de pessoas afetadas para cada tipo de desastre natural ocorrido no Brasil, entre 1991 e 2012. ....	19
Figura 5: Percentual de óbitos para cada tipo de desastre natural ocorrido no Brasil, entre 1991 e 2012. ....	19
Figura 6: Escoamento superficial, antes e depois da urbanização.....	21
Figura 7: Representação dos leitos menor e maior, e da planície de inundação. ....	22
Figura 8: Tipos de movimentos gravitacionais de massa. ....	29
Figura 9: Exemplo de estrutura organizacional de planejamento.....	32
Figura 10: Obtenção de imagem por sensoriamento remoto. ....	36
Figura 11: Níveis de informação em SIG. ....	39
Figura 12: Representação dos formatos digitais. ....	39
Figura 13: Mapa de localização do município de Marques de Souza. ....	49
Figura 14: Hidrografia do município de Marques de Souza - RS. ....	50
Figura 15: Mapa da geomorfologia do município de Marques de Souza - RS. ....	52
Figura 16: Classificação dos Solos do município de Marques de Souza - RS. ....	53
Figura 17: Classificação da Geologia do município de Marques de Souza - RS.....	54
Figura 18: Imagem extraída do software IPHS1, com a bacia hidrográfica do rio Forqueta, demonstrando o local para adicionar-se os parâmetros do modelo SCS. ....	59
Figura 19: Imagem extraída do software IPHS1, com a bacia hidrográfica do rio Forqueta, demonstrando o local para adicionar-se os parâmetros do modelo Muskingum-Cunge. ....	60
Figura 20: Perfis das seções transversais realizados na Sub-bacia 2. ....	62
Figura 21: Planilha do Excel demonstrando a forma de calcular a área da seção transversal e cota de inundação.....	63

Figura 22: Exemplo da elaboração das curvas de nível para a planície de inundação do rio Forqueta, com o limite da cota de inundação para os TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	64
Figura 23: Vetorização da mancha de inundação do TR 100 anos no software ArcGis 10.2. ....	65
Figura 24: Imagem Google Earth Pro de 17/01/2012, com os pontos de ruptura dos movimentos de massa, na região alta do rio Fão. ....	66
Figura 25: Ferramentas do ArcGis para obter as características físicas de cada movimento de massa das bases vetoriais (A) e raster (B). ....	67
Figura 26: Processos realizados no ArcGis para obter o desnível do morro e desnível de rampa. ....	69
Figura 27: Processos realizados no ArcGis para obter as distâncias para falhas geológicas, sistema viário e linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias. ....	70
Figura 28: Processo realizado no Excel para calcular os pesos de cada classe. ....	71
Figura 29: Matriz de preenchimento do método AHP para calcular os pesos de cada base utilizada no mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. ....	73
Figura 30: Índice Randômico Médio do AHP. ....	73
Figura 31: Hietogramas de projeto para a bacia do rio Forqueta, TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	77
Figura 32: Bacia hidrográfica do rio Forqueta delimitada a partir do município de Marques de Souza. ....	78
Figura 33: Hidrogramas da sub-bacia 4, na porção norte de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	79
Figura 34: Hidrogramas da sub-bacia 3, na porção centro-norte de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	80
Figura 35: Hidrogramas da sub-bacia 2, na porção centro-sul de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	81
Figura 36: Hidrogramas da sub-bacia 1, na porção sul de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	81
Figura 37: Espacialização dos perfis topográficos gerados nas quatro sub-bacias que compreendem a área do município de Marques de Souza. ....	83
Figura 38: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações em Marques de Souza, RS, no vale do rio Forqueta. ....	87
Figura 39: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações da área urbana de Marques de Souza. ....	88
Figura 40: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações do município de Marques de Souza (A), com uma aproximação da área urbana do município (B), com as coordenadas geográficas do trabalho de Porcher (2012). ....	89
Figura 41: Comparação entre as coordenadas geográficas adquiridas do trabalho de Porcher (2012) e as manchas de inundações (TRs 10, 50 e 100 anos). ....	90
Figura 42: Comparação entre a Geomorfologia e os tipos de solo, região do alto rio Fão. ....	95

Figura 43: Bases para elaboração do mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa.....	104
Figura 44: Mapa gerado a partir do cruzamento das bases de declividade, desnível de rampa, geomorfologia e distância das linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias .....	106
Figura 45: Mapa gerado a partir do cruzamento dos mapas de declividade, desnível de rampa, distância das linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias e geomorfologia, na região do alto rio Fão, onde foram identificados 137 movimentos de massa.....	108
Figura 46: Mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa no município de Marques de Souza, RS. ....	110
Figura 47: Espacialização das áreas suscetíveis à movimentos de massa na área urbana de Marques de Souza. ....	111
Figura 48: Mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para o município de Marques de Souza. ....	115
Figura 49: Mapa do zoneamento do município de Marques de Souza com zoom na área urbana. ....	116
Figura 50: Mapa do zoneamento do município de Marques de Souza, com zoom em algumas regiões na área rural.....	117

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Causas para os movimentos de massa.....	25
Quadro 2: Tipos de movimentos delimitados pelo grau de inclinação da encosta. ...	26
Quadro 3: Critérios utilizados para a divisão da suscetibilidade a enxurradas e inundações na área de estudo. ....	57
Quadro 4: Coeficientes da equação do tipo PDF, para a bacia do rio Taquari-Antas. ....	57
Quadro 5: Chuva acumulada para os diferentes TRs da bacia hidrográfica do rio Forqueta.....	58
Quadro 6: Valores referentes ao comprimento de rio, área, desnível altimétrico e CN para as Sub-bacias do rio Forqueta. ....	60
Quadro 7: Valores das Sub-bacias do rio Forqueta, para utilização no modelo de Muskingum-Cunge. ....	61
Quadro 8: Comparações do método AHP. ....	74
Quadro 9: Cotas (metros) calculadas no IPHS1 para cada trecho de rio das quatro sub-bacias, para os TRs de 10, 50 e 100 anos. ....	82
Quadro 10: Área (m <sup>2</sup> ) da seção transversal "molhada", calculadas através dos dados do IPHS1 para cada trecho de rio das quatro sub-bacias, para os TRs de 10, 50 e 100 anos.....	82
Quadro 11: Cota altimétrica (metros) atingidas pelas águas para as quatro sub-bacias, nos três cenários (TR 10, 50 e 100 anos). ....	84
Quadro 12: Frequência dos movimentos de massa em relação ao uso da terra. ....	92
Quadro 13: Frequência dos movimentos de massa em relação aos tipos de solos. .	94
Quadro 14: Frequência dos movimentos de massa em relação as unidades geomorfológicas. ....	94
Quadro 15: Frequência dos movimentos de massa em relação as unidades geológicas. ....	95
Quadro 16: Frequência dos movimentos de massa em relação à distância das linhas de contato litológico (Fácies Gramado e Caxias). ....	96

Quadro 17: Frequência dos movimentos de massa em relação às distâncias das falhas geológicas.....	96
Quadro 18: Frequência dos movimentos de massa em relação às distâncias do sistema viário. ....	97
Quadro 19: Frequência dos movimentos de massa em relação à orientação do relevo. ....	97
Quadro 20: Frequência dos movimentos de massa em relação à forma do terreno. ....	98
Quadro 21: Frequência dos movimentos de massa em relação ao desnível do morro. ....	99
Quadro 22: Frequência dos movimentos de massa em relação ao desnível de rampa. ....	99
Quadro 23: Frequência dos movimentos de massa em relação à declividade. ....	100
Quadro 24: Resultado dos pesos para cada intervalo de declividade.....	101
Quadro 25: Resultado dos pesos para cada intervalo de desnível de rampa. ....	101
Quadro 26: Resultado dos pesos para cada intervalo das distâncias das linhas de contato litológico (Fácies Gramado e Caxias). ....	102
Quadro 27: Resultado dos pesos para cada intervalo das unidades geomorfológicas. ....	102
Quadro 28: Matriz de comparação pareada para ponderação das evidências, e determinação dos percentuais de importância de cada base para o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. ....	105
Quadro 30: Valores dos pesos dos locais com baixa, média, alta e sem suscetibilidade aos movimentos de massa. ....	109

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 Desastres Naturais .....	14
2.2 Enchentes, inundações e enxurradas .....	20
2.3 Movimentos de massa .....	24
2.3.1 Classificação dos movimentos de massa .....	26
2.4 Planejamento Ambiental.....	30
2.4.1 Zoneamento Ambiental .....	32
2.5 Geotecnologias .....	34
2.5.1 Sensoriamento remoto .....	35
2.5.2 Geoprocessamento .....	37
2.6 Modelagem Hidrológica.....	40
2.7 Estudos realizados com aplicação de geotecnologias para o mapeamento de áreas de inundações, movimentos de massa e zoneamentos .....	44
2.7.1 Movimentos de massa.....	44
2.7.2 Inundações.....	45
2.7.3 Zoneamento de áreas de risco a inundações.....	45
2.7.4 Estudo semelhante realizado na mesma área de estudo e diferenças metodológicas entre os dois trabalhos .....	46
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>48</b>
3.1 Caracterização da área de estudo .....	48
3.1.1 Localização da área de estudo.....	48
3.1.2 Características físicas .....	50
3.1.2.1 Hidrografia.....	50
3.1.2.2 Geomorfologia.....	51



3.1.2.3 Solos .....	52
3.1.2.4 Geologia .....	53
3.2 Materiais.....	54
3.3 Métodos.....	55
3.3.1 Organização de um banco de dados georreferenciado.....	55
3.3.2 Realização da modelagem hidrológica na bacia do rio Forqueta para geração de um mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações .....	56
3.3.3 Geração de um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.....	65
3.3.4 Elaboração do zoneamento de aptidão do uso do solo para habitação .....	75
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>77</b>
4.1 Mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações .....	77
4.2 Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa .....	92
4.3 Zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação.....	112
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo 1.....</b>	<b>128</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os eventos extremos sempre existiram, tais como inundações, enxurradas, deslizamentos, secas, furacões, terremotos, tsunamis entre outros. Esses fenômenos dependem de características locais para ocorrerem, como tipos de rochas, solos, topografia, vegetação e condições meteorológicas. Quando atingem locais com presença de seres humanos, e causando danos materiais e/ou humanos, e prejuízos socioeconômicos, são considerados desastres (KOBAYAMA et al., 2006).

Segundo Castro (2009), os desastres são normalmente classificados conforme a causa que desencadeou o fenômeno. De acordo com as normas da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que substituiu a Política Nacional de Defesa Civil, aprovada pela Resolução CONDEC n. 2, de 12 de dezembro de 1994, são três os tipos de desastres: naturais, que ocorrem naturalmente, humanos que são causados por ações negativas da sociedade sobre o meio ambiente, e mistos que são quando ações humanas contribuem para intensificar ou agravar os desastres naturais.

No Brasil, desastres desencadeados por movimentos tectônicos, que causam maior destruição como terremotos e tsunamis, não ocorrem, devido a características físicas locais, porém sofre-se bastante com outros tipos de desastres como enxurradas, inundações, deslizamentos e secas. Uma Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC), realizada em 2005 pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), verificou que nos 24 meses anteriores a pesquisa, 50% dos municípios brasileiros haviam declarado terem sofrido por algum tipo de desastre, sendo eles inundações, deslizamentos e erosão. Esses eventos estão normalmente

relacionados à degradação ambiental de áreas frágeis e a ocupações irregulares (SANTOS, 2007).

Não é possível eliminar os eventos naturais, mas com algumas medidas é possível diminuir os danos causados por eles. Primeiramente é necessário entender os conceitos de risco, perigo, vulnerabilidade e suscetibilidade a determinado evento natural. Segundo Kobiyama (2006), o perigo é um fenômeno natural que ocorre em determinada região e período, que pode ocasionar algum tipo de destruição sendo ela de pequena ou até mesmo de grande proporção. Dessa forma são classificados como eventos naturais que ocorrem no globo terrestre, podendo agravar o impacto desse fenômeno devido a atividades humanas, como degradação do ambiente e urbanização. Enquanto que risco é a probabilidade de perdas materiais ou humanas em determinada região e período de tempo, por consequência da presença do perigo.

Conforme Santos (2007), pode-se definir como vulnerabilidade o grau de perda de determinado elemento que foi submetido a um risco, por consequência da ocorrência de um evento natural, ou seja, é a probabilidade de um indivíduo ou grupo ser atingido por algum tipo de fenômeno natural. Já a suscetibilidade significa quanto determinada área ou região são suscetíveis à ocorrência de determinados eventos naturais, ou seja, deve-se verificar se o local de implantação de um imóvel está em uma área que frequentemente sofre com enxurradas, inundações e deslizamentos, por exemplo, e evitar construções nesses locais ou se for construir precisa haver um planejamento antes da execução do projeto.

Dessa forma, as medidas preventivas em áreas suscetíveis a inundações ou movimentos de massa são classificadas como estruturais e não estruturais. As medidas estruturais envolvem obras de engenharia que normalmente são de elevado custo financeiro, como construção de taludes, implantação de sistemas de drenagem e reurbanização de áreas. Já as medidas não estruturais, referem-se a ações políticas públicas voltadas ao planejamento do uso do solo e ao gerenciamento, como o zoneamento ambiental, planos preventivos de defesa civil e educação ambiental. Para evitarmos desastres decorrentes de enxurradas e inundações, são necessárias ações voltadas à educação ambiental, como: respeitar as Áreas de Preservação Permanente (APP), não jogar resíduos sólidos no sistema

de drenagem, impedir a habitação das planícies de inundações e diminuir as áreas impermeáveis dos municípios (TOMINAGA, 2009).

A melhor forma de evitar a ocorrência de desastres naturais é impedir que áreas consideradas suscetíveis a eventos, tais como enxurradas, inundações e deslizamentos, continuem sendo habitadas sem nenhum planejamento (SANTOS, 2007). Com isso o método mais correto de lidarmos com esses fenômenos é através de um planejamento ambiental, que nada mais é que um estudo visando o uso adequado do solo, controle e proteção do meio ambiente. Tem como visão a sustentabilidade, considerando critérios em longo prazo, buscando também estabelecer medidas de curto e médio prazo, permitindo que não só a atual sociedade, mas as futuras tenham acesso aos recursos naturais (SANTOS, 2004).

Um instrumento do planejamento ambiental é o zoneamento ambiental, estabelecido pela Lei nº 6938 de 31 de agosto de 1981, que consiste na divisão de uma região em porções territoriais, obtida através de avaliação detalhada do local. Cada porção (zona) tem as mesmas características, ou seja, alto grau de associação entre si, possuindo grande diferença das outras zonas demarcadas. Assim, ele deve definir as atividades que podem ser desenvolvidas em cada zona, orientando as formas de uso e eliminando conflitos entre tipos incompatíveis de atividades, com isso o zoneamento passará a ser um excelente instrumento de gestão, sendo ele representado através de mapas temáticos, matrizes ou índices ambientais (SANTOS, 2004).

São muitas as dificuldades encontradas para a realização de um zoneamento ambiental em uma região ou município. Necessita-se de muito investimento e de profissionais de diversas áreas para a realização desse estudo. Dessa forma as geotecnologias, através do geoprocessamento e o sensoriamento remoto, são ferramentas que possibilitam a coleta, armazenamento e análise de grandes quantidades de dados, que devido à complexidade dos desastres naturais seriam de difícil realização com metodologias analógicas ou tradicionais. Essas ferramentas permitem a produção de informações em pouco tempo e com um baixo custo, assim elaborando modelos preventivos que dão suporte a tomada de decisões (MARCELINO, 2008).

Segundo Trentin e Bazzan (2013), dados fornecidos por satélites de sensoriamento remoto são utilizados para a identificação, o mapeamento e o monitoramento de áreas suscetíveis a desastres naturais. Os satélites da série LANDSAT e CBERS, possuem sensores de média resolução e estão disponíveis gratuitamente para os usuários. São utilizados para o mapeamento e a identificação de inundações, movimentos de massa e rastros de tornados, podendo também ser realizado análises multitemporais, pois esses satélites armazenam um grande acervo de imagens, principalmente pelo programa LANDSAT que tem imagens desde 1972.

Assim, o sensoriamento remoto aliado ao geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas, surgem como recursos dinâmicos que ampliam a capacidade de mapeamento e de análise, principalmente em virtude dos avanços computacionais, que permitem armazenar e analisar uma quantidade cada vez maior de informações geográficas. Com a combinação desses recursos com os dados de sensoriamento remoto permite simular eventos decorrentes das enxurradas e inundações, bem como, a identificação de cicatrizes provenientes de movimentos de massas, contribuindo para a compreensão desses fenômenos (OLIVEIRA, 2010).

O planejamento territorial já está implementado no meio urbano, instituído pela Lei 10.257 de julho de 2001, ela obriga os municípios com mais de 20.000 habitantes, que possuem aptidão para o turismo e áreas suscetíveis a deslizamentos e inundações a criação de seus planos diretores. Dessa forma é fundamental a realização de um zoneamento ambiental quando realizada a criação de um plano diretor (MARTINS, 2013).

O município de Marques de Souza, localizado na região do Vale do rio Taquari, no centro – leste do Rio Grande do Sul, possui uma área de 125 Km<sup>2</sup> e uma população de 4.068 habitantes (IBGE, 2010). Devido às características físicas, o município sofre frequentemente com enxurradas e inundações em seus principais corpos hídricos. Seu relevo apresenta um padrão de declividades que indica a suscetibilidade a movimentos de massa.

No dia 04 de janeiro de 2010, Marques de Souza foi atingido pelo maior desastre natural já registrado pelo município, segundo a Defesa Civil (2010). A precipitação registrada no município foi de aproximadamente 220 mm em menos de 24 horas.

Dados extraídos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) mostram precipitações intensas em outros municípios acima de Marques de Souza, pertencentes à mesma bacia hidrográfica (Bacia do rio Forqueta): Soledade (210 mm), Putinga (231 mm), Progresso (207 mm), Fontoura Xavier (262 mm), Arvorezinha (188 mm) e Ilópolis (266 mm). Esse evento extremo de precipitação ocasionou uma série de movimentos de massa na porção montante da bacia do rio Fão (afluente do rio Forqueta), ocasionando também enxurradas e inundações nos vales dos principais rios, causando sérios prejuízos para a agricultura, para a pecuária e infraestruturas rurais e urbanas, afetando quase que a totalidade da população e somando um prejuízo de R\$11.000.000,00 (DEFESA CIVIL, 2010).

Segundo informações da Prefeitura Municipal de Marques de Souza, o município não possui plano diretor, existe uma Lei Nº 751, de 04 de janeiro de 2007, denominada Lei de Diretrizes Urbanas (LDU), que em seu artigo 21, parágrafo 4º, impõe que “serão licenciadas construções em terrenos alagadiços ou sujeitos a inundações, após serem drenados, aterrados ou assegurarem implantação da área ocupável até a quota livre de enchentes, definida como sendo de 55 metros”.

Em 04 de março de 2010, o município realizou um estudo, porém, apenas mapeando as cotas de inundações de sua área urbana, demarcando as inundações dos anos de 2007 (55 metros) e de 2010 (59 metros), e apesar do evento ocorrido em 04 de janeiro de 2010, continua utilizando a cota de 55 metros para o licenciamento de construções no município (MUNICIPIO DE MARQUES DE SOUZA, 2015).

Devido à falta de estudos referente a desastres naturais no município de Marques de Souza e por consequência da enxurrada que atingiu o município em janeiro de 2010, este trabalho tem como proposta a realização de um zoneamento ambiental, aplicado à identificação de áreas suscetíveis a eventos hidrológicos extremos, tais como, inundações, enxurradas e movimentos de massa.

Dessa forma, o presente estudo tem o objetivo de realizar um zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação em Marques de Souza, tendo em vista as áreas suscetíveis a enxurradas, inundações e movimentos de massa.

Assim, os objetivos específicos são:

- Organizar um banco de dados georreferenciados composto por bases planialtimétricas contínuas da DSG (Diretoria de Serviço Geográfico) e da Prefeitura Municipal de Marques de Souza;
- Realizar a modelagem hidrológica da bacia do rio Forqueta para gerar um mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações;
- Obter um inventário de movimentos de massa para definir critérios e gerar um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa;
- Estabelecer o zoneamento e as diretrizes da aptidão do uso do solo para habitação em função das áreas suscetíveis a enxurradas, inundações e movimentos de massa.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Desastres Naturais**

Inundações, enxurradas, deslizamentos, secas, furacões, terremotos, tsunamis, entre outros, são considerados eventos extremos, que dependem de características locais para ocorrerem, como tipos de rochas, solos, topografia, vegetação e condições meteorológicas. Quando esses eventos atingem a sociedade, causando impactos e conseqüentemente sérios danos e prejuízos, tais como, humanos, ambientais ou materiais, são denominados desastres naturais (MARCELINO, 2008).

Segundo Castro (2009), os desastres são quantificados conforme efeitos negativos sobre a sociedade, como danos e prejuízos, devido à intensidade dos efeitos, enquanto que os eventos adversos são quantificados em termos de magnitude. Por isso, a intensidade do desastre depende da magnitude do evento e a situação de vulnerabilidade do ambiente afetado.

Os desastres são normalmente classificados conforme a causa que desencadeou o fenômeno. Segundo as normas da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que substituiu a Política Nacional de Defesa Civil, aprovada pela Resolução CONDEC n. 2, de 12 de dezembro de 1994, são três os tipos de desastres: naturais, humanos e mistos. Os naturais são aqueles desencadeados pela própria natureza, sem a ação humana, desastres



humanos são aqueles provocados por ações humanas, normalmente são consequências de degradações ambientais, e os mistos são quando ações humanas contribuem para intensificar ou agravar os desastres naturais, atuando sobre locais degradados pelo homem (CASTRO, 2009).

Segundo Marcelino (2008), o foco da análise dos desastres naturais não deveria estar no processo e sim no evento que o desencadeou, ou seja, aquele que dispara (gatilho) o processo. Pensando assim, mesmo uma construção em um local de risco a deslizamentos, o processo só vai ocorrer se no local houver um período de precipitações intensas, então esse deve ser considerado um desastre natural. Caso for desencadeado por depósitos de resíduos ou vazamento de água e/ou esgoto esse evento deve ser classificado como humano, pois foi a ação direta do homem que desencadeou o evento. Seguindo esse raciocínio, dificilmente teríamos desastres considerados mistos.

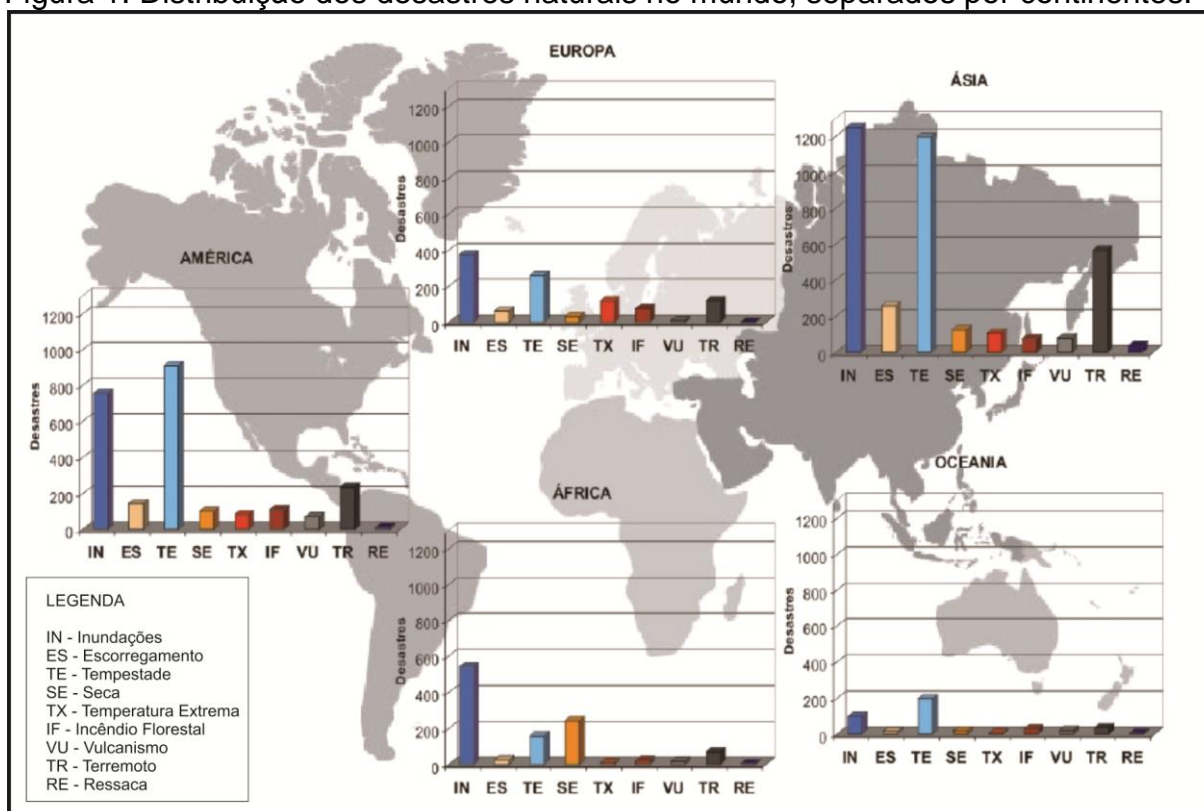
Ainda conforme Marcelino (2008), os desastres naturais podem ocorrer em qualquer parte do mundo, pois os eventos extremos que são responsáveis por desencadear esses desastres ocorrem em diversas regiões do globo terrestre. Porém, alguns locais são mais afetados devido à magnitude e frequência desses eventos, e também pela vulnerabilidade do ambiente atingido.

O continente que apresentou o maior número de registros no período de 1900-2006 foi o asiático (Figura 1), com 3.699 registros, seguido pelo americano, com 2.416 registros (EM-DAT, 2007). Destaca-se também que, em todo o mundo, os tipos de desastres que mais ocorreram foram as inundações (35%) e as tempestades (31%), que é a soma dos eventos associados a furacões, tornados e vendavais. Portanto, aproximadamente 66% dos desastres naturais ocorridos no mundo estão vinculados às instabilidades atmosféricas severas (MARCELINO, 2008).

Conforme Tominaga (2009), nas últimas décadas houve um aumento significativo dos desastres naturais e consequentemente dos prejuízos causados por estes. A partir da década de 70, segundo a EM-DAT (2009) o número aumentou de 50 registros por ano para 350 no ano de 2008, sendo que em 2005 esse número atingiu 500 registros. Ainda conforme a fonte, os prejuízos que em 1975 eram de

aproximadamente 5 bilhões de dólares, passaram a 180 bilhões em 2008. No ano de 2005 quando o Furacão Katrina atingiu os Estados Unidos, o prejuízo chegou aos 210 bilhões de dólares.

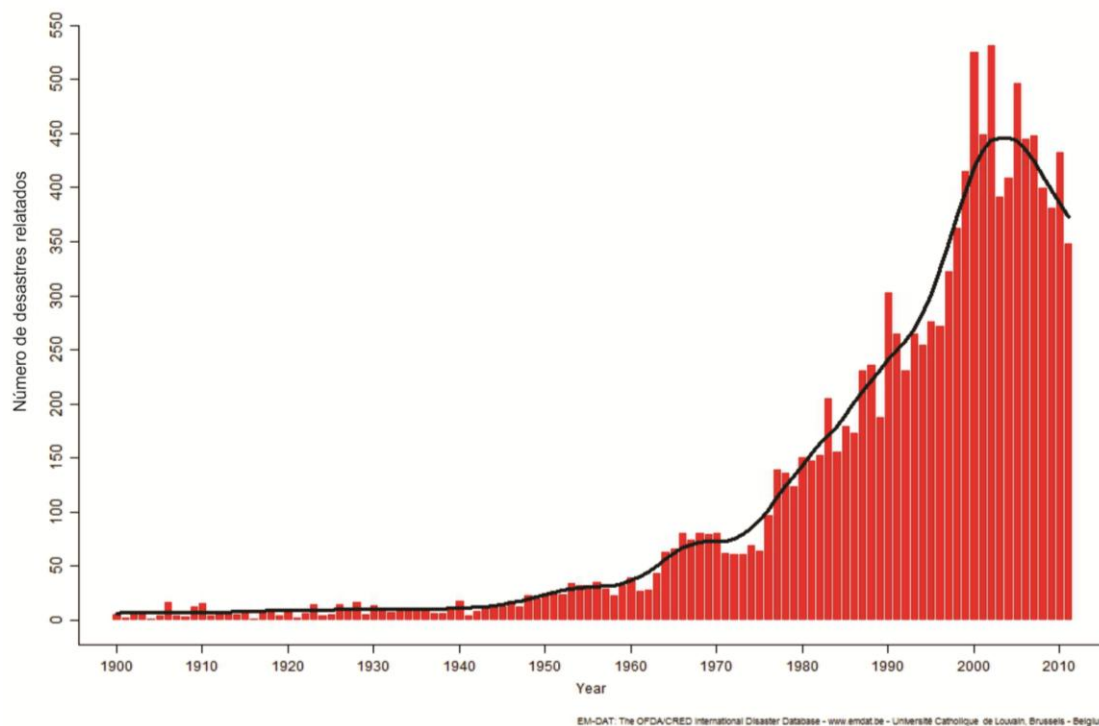
Figura 1: Distribuição dos desastres naturais no mundo, separados por continentes.



Fonte: Marcelino (2008).

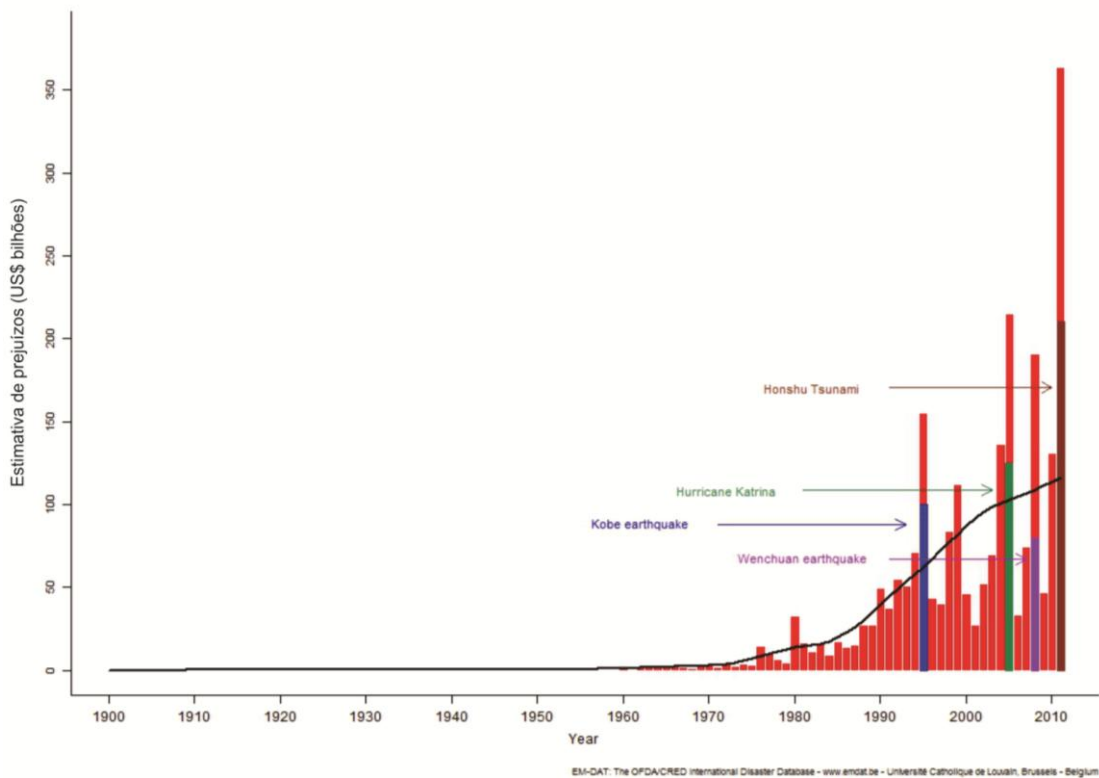
Esses dados podem ser observados na Figura 2, obtida no site EM-DAT (*The International Disaster Database*). Ela demonstra o crescente aumento dos desastres naturais, principalmente no final da década de 1990 até o ano de 2010, ano final dos registros. Já na Figura 3, pode-se verificar um grande aumento nas despesas com esses eventos, gerando alguns picos em anos onde ocorreram eventos de grande magnitude.

Figura 2: Número de desastres naturais relatados de 1900-2011, no mundo.



Fonte: EM-DAT (*The International Disaster Database*) - <http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>.

Figura 3: Estimativa de prejuízos (US\$ bilhões) causados por desastres naturais 1900-2011, no mundo.



Fonte: EM-DAT (*The International Disaster Database*) - <http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>.

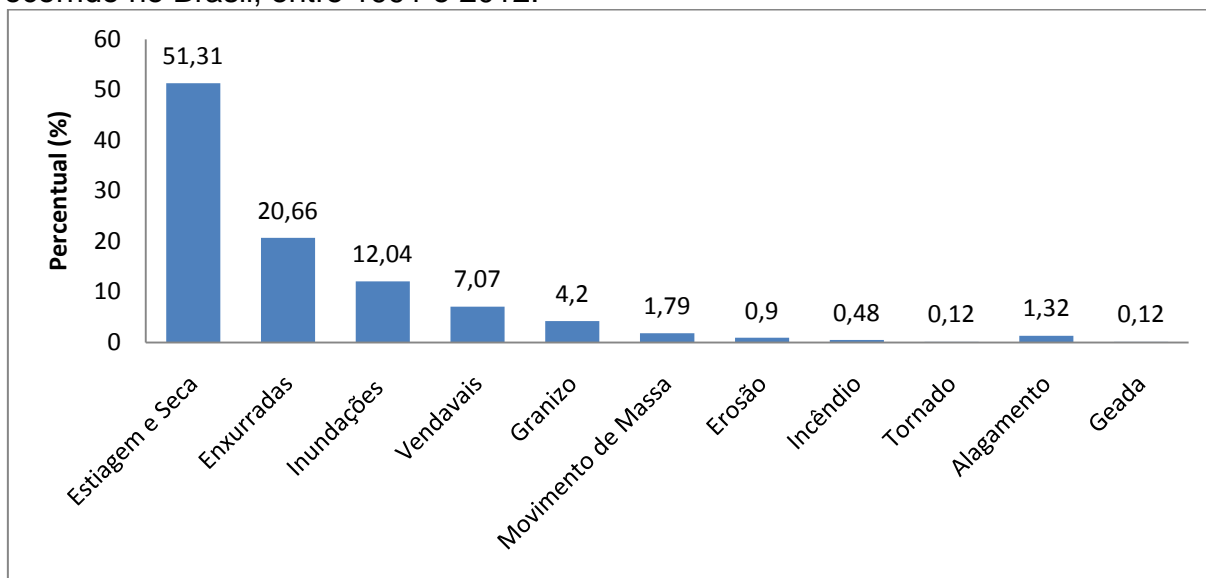
Ainda segundo Tominaga (2009), as Nações Unidas declarou a década de 1990 como a Década Internacional para Redução de Desastres Naturais (*International Decade for Natural Disaster Reduction – IDNDR*). Foram desenvolvidas estratégias para a redução dos riscos decorrentes de perigos naturais, com a implantação da Estratégia Internacional de Redução a Desastres Naturais (*International Strategy for Disaster Reduction – ISDR*), com o objetivo de formar parcerias para a implantação de medidas de redução de riscos, pois o perigo de ocorrer determinado desastre natural em geral já é conhecido e muitas vezes inevitável, então o que se deve fazer é diminuir a exposição e a vulnerabilidade da população, isto é, melhorar também as condições de enfrentamento dos desastres.

No Brasil, a maioria dos desastres naturais são desencadeados por processos atmosféricos, os quais resultam em inundações, enxurradas, deslizamentos e tempestades. Esses eventos ocorrem quando há períodos longos e intensos de precipitações pluviométricas (KOBAYAMA, et al., 2006). Mesmo havendo uma concentração de chuva em determinados meses do ano, conforme características de cada região do Brasil, ainda assim, em boa parte do país podem ocorrer chuvas extremas durante todo o ano, dificultando as previsões e, conseqüentemente, as ações de alerta para esses eventos (OLIVEIRA, 2010).

Conforme o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012, publicado no ano de 2013, pode-se verificar um aumento no número de desastres naturais. Verifica-se que na década de 2000 em diante houve um significativo aumento no número de desastres naturais (78%), porém deve-se cuidar ao afirmar que realmente obteve esse aumento, pois se sabe da fragilidade da defesa civil em manter atualizados todos os seus registros (CEPED, 2013).

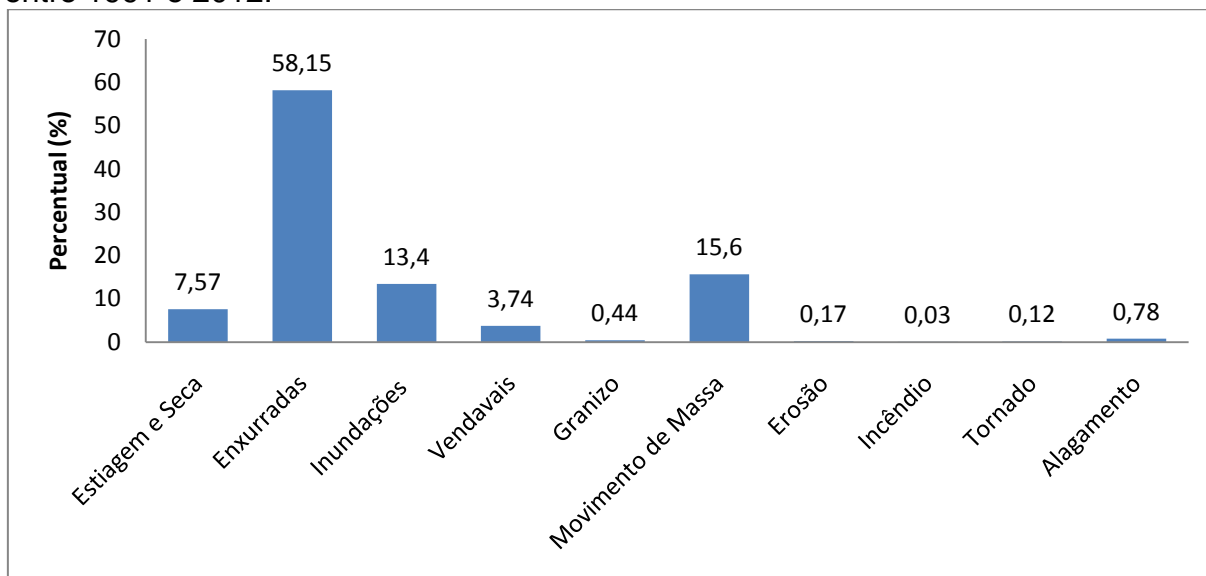
Os desastres naturais que mais ocorreram nesse período, foram estiagem e seca, porém verifica-se que os que causaram maior número de óbitos foram enxurradas, movimentos de massa e inundações, conforme demonstrado nas Figuras 4 e 5 (CEPED, 2013).

Figura 4: Percentual de pessoas afetadas para cada tipo de desastre natural ocorrido no Brasil, entre 1991 e 2012.



Fonte: Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013).

Figura 5: Percentual de óbitos para cada tipo de desastre natural ocorrido no Brasil, entre 1991 e 2012.



Fonte: Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013).

Pode-se verificar que as enxurradas, inundações e deslizamentos atingem uma grande parcela das regiões do planeta. No Brasil, esses eventos extremos são responsáveis pela maior parte dos óbitos relacionados a desastres naturais. Conforme verificado por Santos (2007), os fenômenos climáticos extremos, como as instabilidades severas, potencializadas pela ação humana, são as principais causas dos desastres no Brasil.

Segundo Marcelino (2008), as precipitações estão aumentando na região sul e sudeste do Brasil. Isso ficou evidente principalmente a partir da publicação do 4º Relatório do IPCC (IPCC, 2007). O relatório menciona que haverá um aumento nos desastres naturais de origem atmosférica, devido às mudanças climáticas relacionadas ao aquecimento global.

Ainda conforme Marcelino (2008), em virtude do aumento das precipitações intensas, somado aos desmatamentos de encostas, a ocupação das planícies de inundação, ao assoreamento dos rios e a impermeabilização urbana (asfaltamento de ruas, construções, etc.), as inundações bruscas em áreas urbanizadas se tornarão um dos principais problemas ambientais, principalmente na região sul e sudeste, como mencionado anteriormente.

Nesse contexto se faz necessário a criação de formas de prevenção, que minimizem as consequências deste fenômeno, visando sempre à diminuição do número de pessoas afetadas e vitimadas.

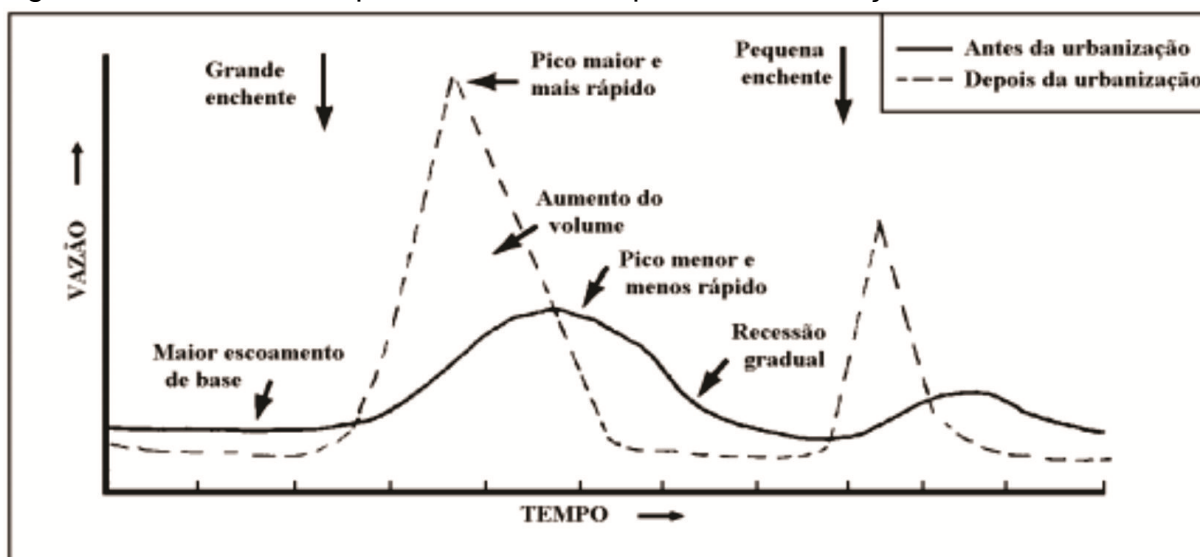
## **2.2 Enchentes, inundações e enxurradas**

Nas últimas décadas houve um aumento da população urbana no Brasil. Esse crescimento acelerado iniciou-se a partir da década de 1960, gerando assim uma população urbana desorganizada, com uma infraestrutura inadequada (TUCCI, 2006).

Segundo Tucci (2006), o desenvolvimento urbano modifica a cobertura vegetal, provocando efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural. A urbanização altera a cobertura das bacias, tornando-as mais impermeáveis, assim aumentando o escoamento superficial, pois o volume que deixa de infiltrar acaba ficando na superfície. Com a construção de condutos para realizar o escoamento superficial, há um escoamento mais rápido, consequentemente aumentando as vazões máximas, com isso antecipando seus picos no tempo, conforme representado na Figura 6.

Os eventos extremos relacionados ao regime fluvial têm como principais características a baixa frequência de ocorrência e alta magnitude, sempre relacionados aos períodos de cheias. Os termos mais utilizados para denominar os eventos extremos relacionados ao regime fluvial são as enchentes, inundações e enxurradas (OLIVEIRA, 2010).

Figura 6: Escoamento superficial, antes e depois da urbanização.



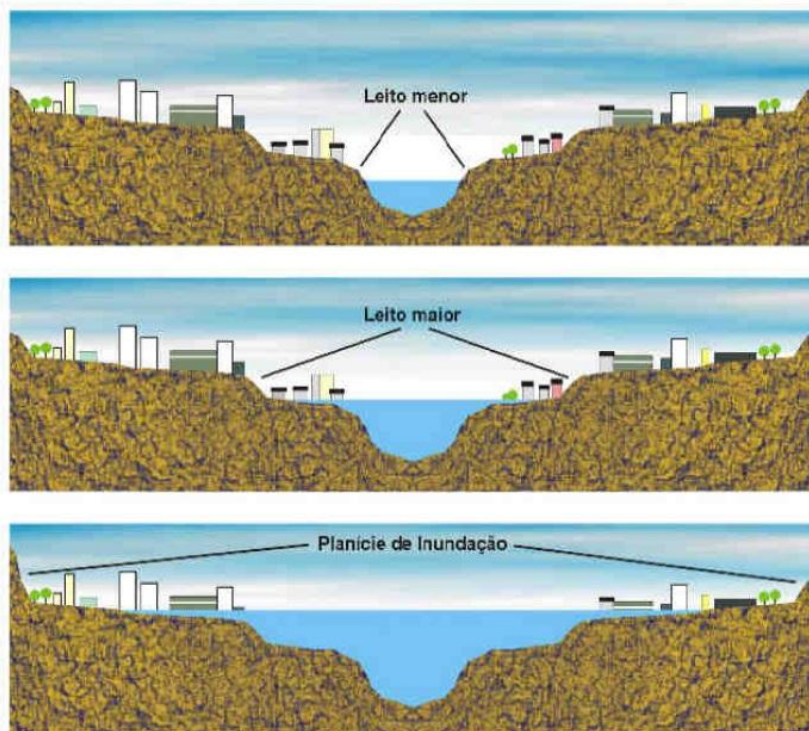
Fonte: Adaptado de Tucci (2006).

As enchentes em áreas urbanas podem ocorrer devido a dois fatores, a urbanização que causa o aumento da frequência e magnitude das enchentes por consequência da ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. E enchentes em áreas ribeirinhas, que são causadas naturalmente, porém atingem a população que ocupa o leito maior dos rios (TUCCI, 2006).

Segundo Castro (2009), enchente é a elevação do nível de água de um rio, acima de sua vazão normal, ultrapassando assim a capacidade natural de escoamento, podendo causar inundações. A inundação é quando ocorre o transbordamento do nível do rio (leito maior, conforme Figura 7), ou quando acontece o acúmulo de água em regiões por falta de drenagem, e a enxurrada é o volume de água que escoar na superfície do terreno, com grande velocidade, resultante de fortes chuvas.

Conforme Oliveira (2010) pode-se afirmar que as enxurradas ocorrem simultaneamente com as inundações, diferenciando-se pela força da correnteza da água, capaz de transportar grande quantidade de sedimentos, fragmentos vegetais e equipamentos de uso antrópico. Outro termo utilizado é o alagamento, que é o acúmulo de água no leito das ruas e no perímetro urbano por consequência de grandes chuvas, em cidades onde o sistema de drenagem é ineficaz, com isso não conseguindo escoar as águas superficiais.

Figura 7: Representação dos leitos menor e maior, e da planície de inundação.



Fonte: Eckhardt (2008).

Segundo Tucci et al. (1995), nos períodos de maior precipitação, as águas podem ocupar o leito maior do rio, com uma frequência média de dois anos, ou seja, em um tempo de retorno (TR) de dois anos. De acordo com Oliveira (2010), o TR é o período entre duas cheias de mesma magnitude. Para a realização desse cálculo é necessária a obtenção das séries históricas de vazão ou de cotas.

A magnitude e frequência das inundações vão depender da intensidade e distribuição da precipitação, da quantidade de solo impermeabilizado, do grau de saturação do solo e das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem (AMARAL; RIBEIRO, 2009).



As inundações não possuem uma distribuição regular, dessa forma quando eventos de grande magnitude demoram a ocorrer, a sociedade esquece, e acaba voltando a habitar locais com riscos a esses fenômenos. Assim, nas cidades ribeirinhas as águas atingem residências, vias públicas, áreas de lazer, comércio e indústrias, causando danos materiais, problemas sanitários e em casos mais graves a perda de vidas (TUCCI; BERTONI, 2003). Já em áreas rurais, a planície de inundação é normalmente ocupada com atividades de agricultura ou pecuária, com poucas moradias nesses locais, dessa forma os impactos são menores do que os do meio urbano (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995).

Uma forma de diminuir os impactos causados por esses eventos extremos é através de um sistema de prevenção e alerta para a sociedade (ECKHARDT, 2008). Porém deve-se salientar que a previsão do nível de vazão de um corpo hídrico depende de previsões meteorológicas, e essas só podem ser previstas com algumas horas de antecedência, assim a prevenção a inundações fica comprometida a esse pequeno espaço de tempo (OLIVEIRA, 2010).

Conforme Tucci (2013, p. 623), as previsões de inundações podem ser realizadas de curto ou longo prazo. A previsão de curto prazo, “permite estabelecer o nível e seu tempo de ocorrência para a seção de um rio com antecedência que depende da previsão da precipitação e dos deslocamentos da cheia na bacia”, normalmente utilizada para avisar as pessoas que habitam regiões ribeirinhas e operadores de obras hidráulicas. Já as previsões a longo prazo são fundamentadas em termos estatísticos, sem saber precisamente em que momento a inundação vai ocorrer. Esse método se baseia em ocorrências do passado, e permite estimar níveis de inundações para alguns riscos escolhidos.

Além das previsões, pode-se realizar algumas medidas para controle das inundações, sendo estas divididas em medidas estruturais e medidas não estruturais. Porém, deve-se salientar que é impossível controlar totalmente as inundações, mas com algumas medidas será possível minimizar suas consequências. As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial, ou seja, obras de engenharia visando à redução do risco a inundações, já as não estruturais, são aquelas em que os danos diminuem em decorrência da melhor convivência da população com esses fenômenos, ou seja, evitando a ocupação

dessas áreas (realização de um zoneamento), principalmente as de maior risco, e com sistemas de prevenção a esses eventos extremos eficientes (TUCCI, 2013).

Apesar de todas as dificuldades de prevenção e medidas de controle a esses eventos extremos, a melhor forma de evitar desastres decorrentes desses fenômenos é através de um planejamento das áreas de risco e uma melhoria dos sistemas de alerta, com isso pode-se diminuir os prejuízos e danos causados pelas inundações na sociedade, contribuindo para uma melhor convivência do homem com esses eventos (OLIVEIRA, 2010).

## **2.3 Movimentos de massa**

Os movimentos de massa consistem em importante processo natural que atua na dinâmica das vertentes. Esses fenômenos ocorrem naturalmente na superfície da terra, como parte do processo de modelagem do relevo, resultantes da ação contínua do intemperismo e dos processos erosivos. Também podem ser verificados em locais onde ações humanas alteraram as características naturais do terreno, com isso gerando um desequilíbrio no local, modificando as formas das encostas com uma geometria menos estável do que nas condições originais (VEDOVELLO; MACEDO, 2007).

O Brasil é suscetível à ocorrência de movimentos de massa, isso se deve aos grandes maciços montanhosos, e às condições climáticas, que intensificam as chuvas no verão. Além disso, ações antrópicas nas vertentes das montanhas, relacionados principalmente pela ocupação irregular das encostas, como desmatamento e corte de taludes, propiciando uma maior suscetibilidade à ocorrência dos movimentos de massa (GUIMARÃES et al., 2008).

Martins (2013) utilizou a proposta de Cruden e Varnes (1996) para caracterizar as possíveis causas de movimentos de massa, dividindo-as em geológicas, morfológicas, físicas e humanas, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Causas para os movimentos de massa.

<b>Causas geológicas</b>	<b>Causas morfológicas</b>	<b>Causas físicas</b>	<b>Causas humanas</b>
Materiais fracos	Levantamento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavações de taludes
Materiais sensíveis	Alívio por degelo	Derretimento rápido de neve	Sobrecarga no talude ou na crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial no pé do talude	Precipitações excepcionalmente prolongadas	Rebaixamento (reservatórios)
Materiais Cisalhados	Erosão por ondas no pé do talude	Rebaixamentos rápidos (enchentes e marés)	Desmatamento
Materiais fissurados ou fraturados	Erosão glacial no pé do talude	Terremotos	Irrigação
Orientação desfavorável de descontinuidades (acamamento xistossidades)	Erosão nas margens laterais	Erupções vulcânicas	Mineração
Orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades)	Erosão subterrânea	Descongelamento	Vibração artificial
Contraste de permeabilidade	Deposição de cargas no talude ou na crista	Intemperismo por congelamento e descongelamento	Vazamento de água
Contraste de rigidez (material denso, rígido sobre materiais plásticos)	Remoção da vegetação	Intemperismo por expansão e retração	

Fonte: Martins (2013).

Conforme Martins (2013), os fatores geológicos e geomorfológicos certamente influenciam nos movimentos de massa, pois as diversas composições de rochas e solos apresentam resistências diferentes podendo assim gerar movimentos de massa. As falhas e fraturas presentes nas encostas proporcionam pontos de

fraqueza, assim favorecendo a ocorrência de deslizamentos. A análise da declividade é muito importante, pois conforme a geometria da encosta pode-se prever qual o tipo de movimentos de massa que poderá ocorrer nessa encosta, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Tipos de movimentos delimitados pelo grau de inclinação da encosta.

<b>Principais movimentos</b>	<b>Faixa de declividade</b>	<b>Material</b>
Rastejo	0° a 5°	Aluviões/colúvios
Escorregamento rotacional lento	5° a 15°	Colúvios
Escorregamento rotacional rápido	15° a 25°	Colúvios e solos de alteração
Escorregamento translacional	>25°	Solos rasos (colúvios e solos de alteração)

Fonte: Martins (2013).

A precipitação pluviométrica é talvez o fator mais importante para a ocorrência de movimentos de massa. Os movimentos de massas de solos estão mais relacionados a chuvas que ocorreram em dias anteriores, ou seja, ao acúmulo de água no solo, que influencia na diminuição da pressão neutra do solo e aumento do peso e da ação da força da gravidade. Já as massas de rochas podem ser deflagradas por chuvas de curta duração, pois a água exerce pressão em descontinuidades existentes nas rochas. E os movimentos do tipo corrida, estão associados a chuvas intensas e contínuas com índices pluviométricos excepcionais (SANTOS, 2007).

### 2.3.1 Classificação dos movimentos de massa

Os movimentos de massa podem ser classificados de diversas formas dependendo da bibliografia pesquisada. Conforme Tominaga (2009), internacionalmente a mais utilizada é a de Varnes (1978), ela baseia-se no tipo de movimento e o tipo de material transportado. Entre as classificações brasileiras as mais utilizadas são as de Freire (1965), de Guidicini e Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992), porém deve-se ressaltar que todo esquema proposto possui limitações,

pois na natureza os deslizamentos são mais complexos, “dificultando estabelecer limites entre classes ou ainda pela manifestação de várias classes num mesmo movimento” (TOMINAGA, 2009, p. 27).

Bressani (2013, p. 164-166) propõe a classificação desenvolvida por Cruden e Varnes (1996) que é baseada em Varnes (1978), sendo uma das mais utilizadas, onde os movimentos de massa são classificados em dois termos, “onde o primeiro indica o material envolvido (solo, rocha, ou detritos) e o segundo o tipo de movimento, que envolve geometria e forma de movimento”, conforme verificado na Figura 8.

Para Bressani (2013), os principais tipos de movimentos gravitacionais de massa são queda de lascas ou blocos, tombamento de rocha, deslizamento rotacional, deslizamento translacional ou planar, escoamento ou espraçamento e fluxo ou corrida de materiais.

Os deslizamentos rotacionais são eventos que ocorrem com frequência na natureza, isso se deve pelo fato de haver massas de materiais homogêneos em profundidade. “O deslocamento da massa ocorre ao longo de uma superfície de deslizamento curva no sentido vertical. Em planta, muitas vezes geram superfícies côncavas na superfície”, podendo ser observadas em estradas quando o aterro sofre ruptura (BRESSANI, 2013, p. 164-166).

Já nos deslizamentos translacionais, “o material se desloca sobre uma superfície de ruptura planar definida por algum contato entre materiais ou onde há variações de resistência ou permeabilidade, sendo geralmente movimentos mais rasos que os rotacionais”. Alguns exemplos dessa superfície de ruptura são descontinuidades do maciço rochoso, a interface entre solo residual e rocha, estratificações em arenitos ou solos deles derivados e camadas argilosas criadas por iluviação (BRESSANI, 2013, p. 164-166).

Os movimentos retratados como escoamentos ou espraçamentos são considerados mais complexos. Conforme Bressani (2013) esses movimentos ocorrem:

Quando uma massa de material coesivo ou rocha está apoiada sobre um material de menor resistência e de comportamento frágil, podem ocorrer

deformações acentuadas que levam o material superior a apresentar uma série de fissuras e trincas. O material fissurado pode então sofrer movimentos de subsidência, rotação e translação sobre o material menos resistente, com significativos movimentos laterais, até que se desintegre e distorça de forma acentuada, enquanto o material subjacente flui de forma ascendente através das fissuras (BRESSANI, 2013, p. 165-166).

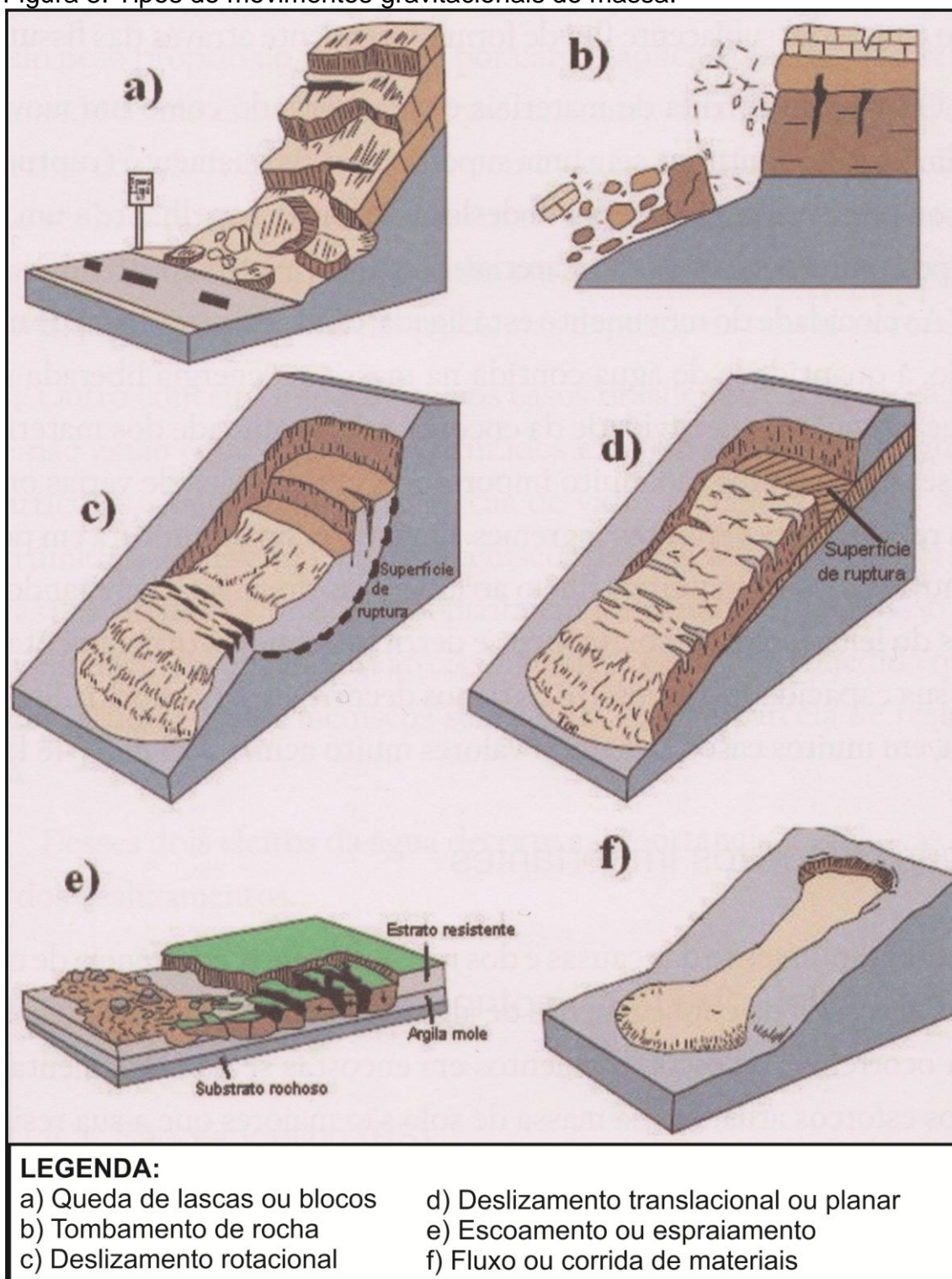
Segundo Bressani (2013), o fluxo ou corrida de materiais é definido como um “movimento longitudinalmente contínuo, sem uma superfície de cisalhamento (ruptura) bem definida ou preservada”. Ainda conforme o autor:

O material se desloca de forma semelhante a um líquido viscoso, podendo envolver desde materiais terrosos (misturas), arenosos, blocos ou lama. A velocidade do movimento está ligada, diretamente ao tipo de material envolvido, à quantidade de água contida na massa e à energia liberada no processo, que é função da declividade da encosta e da fragilidade dos materiais. No Brasil esses movimentos são muito importantes em colúvios de várias origens e em solos residuais em vertentes íngremes. Quando ocorre a ruptura em períodos muito chuvosos, esses materiais fluem ao longo das drenagens agregando água e materiais do leito (solo, blocos, troncos e detritos gerais), o que aumenta sobremaneira sua capacidade de erosão e os danos decorrentes. A velocidade em geral é elevada, em muitos casos atingindo valores muito acima de 5m/s (~18 km/h) (BRESSANI, 2013, p. 166).

Os deslizamentos são compostos por processos, os quais podem ser identificados previamente, dessa forma sabe-se os locais mais suscetíveis a ocorrência desses fenômenos. Isso é possível graças ao monitoramento e conhecimento, das condições naturais que favorecem a sua ocorrência, agentes e fatores condicionantes, potencializadores e deflagradores, e mecanismos envolvidos na movimentação dos materiais. Com isso pode-se estimar a tipologia e a magnitude do evento, podendo prever e estimar condições, frequência e os locais onde provavelmente ocorrerão os eventos (SANTOS, 2007).

Conforme Press et al. (2008), a forma mais correta de evitar desastres decorrentes de deslizamentos é através da proibição de construções em áreas suscetíveis a movimentos de massa. É necessário a realização de um estudo geológico adequado, juntamente com um zoneamento do solo. Com projetos de arquitetura e paisagismo, é possível evitar a remoção da vegetação e alteração da declividade, impedindo assim que taludes naturalmente estáveis se tornem instáveis. Também é imprescindível planejar adequadamente a drenagem da água nos taludes, pois se houver um acúmulo de água, o muro de contenção pode romper, causando assim deslizamentos de massa.

Figura 8: Tipos de movimentos gravitacionais de massa.



Fonte: Bressani (2013).

Conforme Tominaga (2009) são duas as medidas preventivas, denominadas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são as que envolvem obras de engenharia, normalmente com um elevado custo de execução. Já as medidas não estruturais são ações de políticas públicas, direcionadas ao planejamento do uso do

solo, educação ambiental, planos preventivos e zoneamentos ambientais, essas com um menor custo de implantação.

Nesse contexto, pode-se dizer que a melhor forma de evitar desastres decorrentes de deslizamentos é impedir a ocupação de locais suscetíveis à ocorrência desses eventos, porém isso só é possível se a população estiver ciente dos riscos, para isso se faz necessário políticas públicas, que irão informar os locais impróprios para ocupação.

## **2.4 Planejamento Ambiental**

A organização do espaço sempre foi uma premissa para grupos de pessoas que se propõem a viver em estado gregário, sob objetivos e normas comuns. Esta disposição vem sendo observada desde a antiguidade, quando já existiam formas de planejamento (SANTOS, 2004).

O planejamento ambiental é um processo, com desenvolvimento de técnicas, elaborado como um sistema estruturado que envolve etapas distintas. Os objetivos são identificados e cria-se procedimentos e programas para atingi-los, assim pretende-se uma melhoria da qualidade de vida em uma escala espacial e temporal conciliando desenvolvimento e qualidade ambiental (CASAGRANDE, 2005).

Dessa forma o planejamento ambiental é visto como o estudo que visa à adequação do uso, controle e proteção ao meio ambiente, além do atendimento das aspirações sociais e governamentais expressas ou não em uma política ambiental. Tem como visão a sustentabilidade, considerando critérios em longo prazo, buscando também estabelecer medidas de curto e médio prazo, permitindo que não só a atual sociedade, mas as futuras tenham acesso aos recursos naturais (SANTOS, 2004).

Foi nas últimas três décadas que começou a se discutir sobre o planejamento ambiental. Isso se deve ao aumento da competição por terras, água, recursos energéticos e biológicos, gerando assim uma necessidade de organização do uso do



solo, com a ideia de compatibilizar esse uso com a proteção de ambientes ameaçados, objetivando uma melhoria da qualidade de vida da população (SANTOS, 2004).

Conforme Franco (2001), o objetivo principal do planejamento Ambiental é atingir o desenvolvimento sustentável da sociedade e de seus elementos, ou seja, dos agroecossistemas e dos ecossistemas urbanos. Com isso é possível diminuir os gastos com fontes de energia, minimizando os riscos e impactos ambientais, procurando manter a biodiversidade dos ecossistemas. Ainda segundo o mesmo autor:

Naturalmente o planejamento ambiental trabalha com o conceito de economia de longo prazo fundamentada numa ética ecológica, onde a manutenção da integridade dos bancos genéticos entra no conjunto de medidas ligadas a garantir a possibilidade de vidas e civilizações futuras (FRANCO, 2001, p. 36).

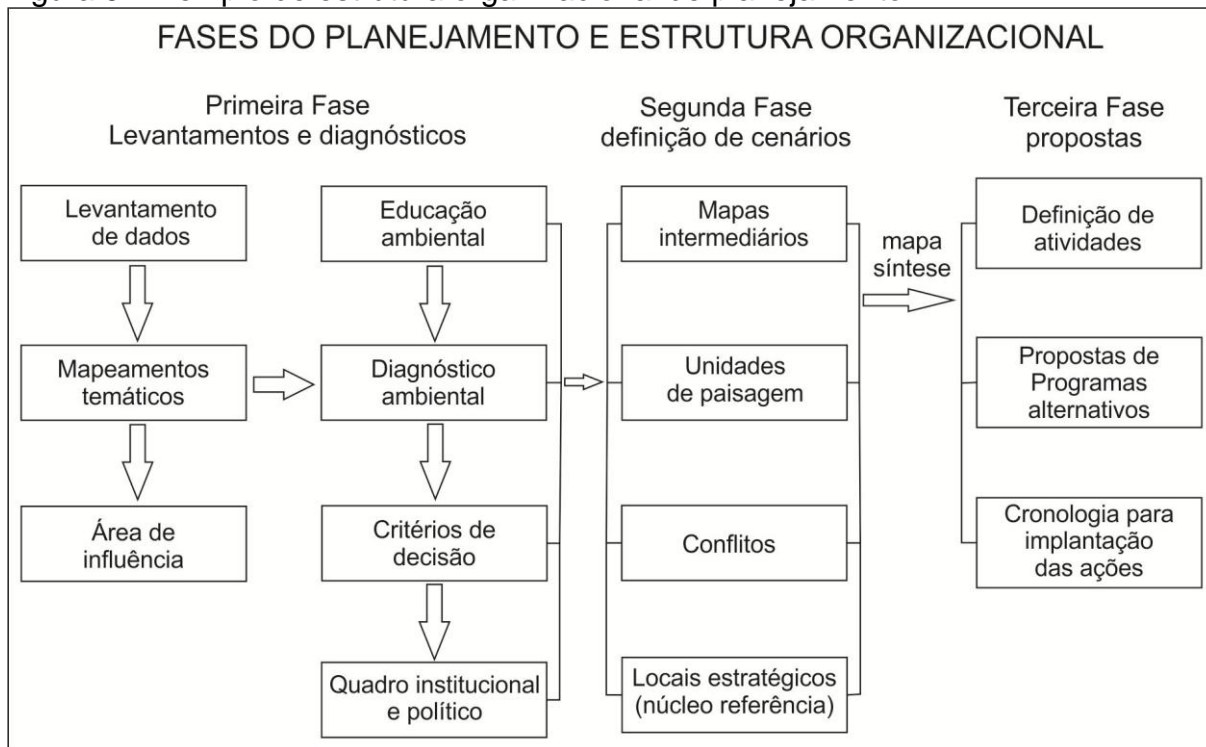
O planejamento ambiental deve ser organizado em uma estrutura que vai envolver pesquisa, análise e síntese. A pesquisa tem como função reunir e organizar os dados, facilitando assim a interpretação. Após a organização dos dados é feita a análise (avaliação) desses, com objetivo de atingir a compreensão da área de estudo, seus acerto e conflitos, e por último a síntese, que é a aplicação dos conhecimentos alcançados para a tomada de decisões (SANTOS, 2004).

Ainda conforme Santos (2004), para o cumprimento dessas três etapas citadas anteriormente é necessário que sejam realizadas em fases, sendo que o resultado de uma é a base para o desenvolvimento da fase seguinte. Assim, Santos (2004, p. 33) cita a forma de organização do planejamento conforme Silva (2001), “as fases são: preparação (ou levantamento de dados e negociações), diagnóstico, hierarquização das informações, integração dos resultados e de proposições finais. Outra forma de organização pode ser dividida em fases e subfases”.

Para cada fase um conjunto de métodos pode ser utilizado. A definição dos objetivos só será concretizada após a avaliação de quem contrata o planejamento, do executor do planejamento e dos órgãos e organizações ambientais que têm o poder de interferência na região. É necessário que haja um consenso sobre os propósitos, a ética e a viabilidade técnica, administrativa, operacional e política dos objetivos finais. Após a obtenção desse consenso, espera-se que os planejadores

apresentem uma estrutura organizacional do trabalho a ser realizado, a Figura 9 apresenta um exemplo de estrutura organizacional (SANTOS, 2004).

Figura 9: Exemplo de estrutura organizacional de planejamento.



Fonte: Adaptado de Santos (2004).

Ainda conforme Santos (2004), o planejamento ambiental deve funcionar como um processo permanentemente ativo, podendo ser alterado de acordo com as modificações que possam ocorrer no meio e na sociedade envolvida. Dentro do planejamento ambiental existem diversos instrumentos, tais como, Zoneamentos, Estudos de Impacto Ambiental, Planos de Bacias Hidrográficas, Planos Diretores Ambientais, Plano de Manejo ou Áreas de Proteção Ambiental, entre outros, a escolha da utilização de um ou de outro vai depender do tipo de estudo realizado, sendo que no presente estudo será utilizado o zoneamento.

#### 2.4.1 Zoneamento Ambiental

O zoneamento ambiental, estabelecido pela Lei nº 6938 de 31 de agosto de 1981, é a divisão de uma região em porções territoriais, obtida através de avaliação detalhada do local. Cada porção (zona) tem as mesmas características, ou seja, alto

grau de associação entre si, possuindo grande diferença das outras zonas demarcadas. Assim, ele deve definir as atividades que podem ser desenvolvidas em cada zona, orientando as formas de uso e eliminando conflitos entre tipos incompatíveis de atividades, com isso o zoneamento passará a ser um excelente instrumento de gestão, sendo ele representado através de mapas temáticos, matrizes ou índices ambientais (SANTOS, 2004).

Bacani e Luchiari (2014, p. 185), citam em seu trabalho a forma de elaboração do zoneamento ambiental desenvolvida por Becker e Egler (1996), ela deve contemplar os seguintes aspectos:

- a) representar instrumento técnico de informações sobre o território, necessária para a sua ocupação racional e o uso sustentável dos recursos naturais;
- b) prover uma informação integrada em uma base geográfica;
- c) classificar o território de acordo com a sua capacidade de suporte ao uso e ocupação.
- d) ser condicionante de planejamento e gestão para o desenvolvimento em bases sustentáveis, colocando-se como instrumento corretivo e estimulador desse desenvolvimento.

Dessa forma o zoneamento ambiental tem como meta o desenvolvimento socioeconômico condicionado à manutenção, em longo prazo, dos recursos naturais e melhoria das condições de vida do homem. Para a sua formulação são utilizados indicadores ambientais, destacando as potencialidades, vocações e as fragilidades do ambiente estudado (SANTOS, 2004).

Para Robaina e Trentin (2013) o zoneamento do território, a partir da avaliação da vulnerabilidade e da suscetibilidade, é considerado um instrumento fundamental para a integração dos riscos ao planejamento ambiental.

Atualmente tem-se verificado um aumento das áreas de riscos no Brasil. Os órgãos públicos não possuem recursos financeiros, técnicos e organização, ou muitas vezes até mesmo por falta de empenho para resolver tais demandas. Sabe-se que para a realização de um zoneamento de áreas de risco os custos são elevados e têm-se dificuldades em produzi-los, por causa das diversas atividades (inspeções de campo), necessárias para criá-lo (MENEZES, 2014).

## 2.5 Geotecnologias

Devido à “necessidade de introduzir, discutir, analisar e apresentar os dados cartográficos, os Sistemas de Informação Geográfica – SIG’s vem ganhando muita importância”. São ferramentas muito utilizadas para análises de desastres naturais, com diferentes classes de desenvolvimento (MENEZES, 2014, p. 43).

Dessa forma as geotecnologias, através do geoprocessamento e o sensoriamento remoto, são ferramentas que possibilitam a coleta, armazenamento e análise de grandes quantidades de dados, que devido à complexidade dos desastres naturais seriam de difícil realização com metodologias analógicas ou tradicionais (MARCELINO, 2008).

Conforme Rosa (2005) e Barbosa et al. (2011), as geotecnologias podem auxiliar em ações de planejamento ambiental, incluindo a organização e diagnóstico de Áreas de riscos a desastre naturais. São consideradas como um conjunto de tecnologias destinadas a coletar, processar, analisar e oferecer informações com referências geográficas para fins de estudos do espaço geográfico e dos aspectos ambientais nele inseridos. Dentre as geotecnologias existentes destaca-se o sensoriamento remoto, geoprocessamento, topografia, GPS, SIGs, entre outros.

Pode-se definir como sensoriamento remoto a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, que são acoplados em aeronaves, satélites, ou outras plataformas, tem o objetivo de estudar os eventos, acontecimentos e procedimentos que ocorrem na superfície do globo terrestre, “a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações” (NOVO, 2010, p. 28).

O geoprocessamento é o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais, que opera sobre bases de dados georreferenciados, para transformá-los em informação relevantes (SILVA, 2009).

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um sistema de posicionamento geográfico que fornece as coordenadas de um lugar na Terra, desde que se tenha um aparelho receptor de sinais de GPS. É um sistema multipropósitos, que permite aos usuários determinar suas posições expressa em latitude, longitude e altura geométrica ou elipsoidal em função das coordenadas cartesianas X, Y e Z em relação ao centro de massa da Terra (BERNARDI; LANDIM, 2002).

O sistema de informação geográfica (SIG) é um ambiente computacional, que possibilita o cruzamento entre dados, (imagens de satélite, cartas topográficas, cartas temáticas, aerofotogrametria, etc.) a experiência e o conhecimento prático e teórico do usuário deste sistema, permitindo assim a criação de um produto de análise das informações obtidas, e a realização de uma avaliação crítica ambiental aceitável em cada situação temporal necessária (CERVANTES, 2013).

Segundo Ferreira e Filho (2009), as geotecnologias são aplicadas no planejamento e na criação de modelos voltados para a gestão de sistemas ambientais em constante mudança. São ferramentas importantes que agilizam a análise ambiental, auxiliando na tomada de decisões sob uma visão perceptiva da realidade.

### **2.5.1 Sensoriamento remoto**

Atualmente o sensoriamento remoto é importante para a elaboração de mapas de riscos a desastres naturais, devido a agilidade e a redução de custos obtidos com a utilização de imagens orbitais, através de um mapeamento multiespectral da superfície da Terra (ROSA, 2005).

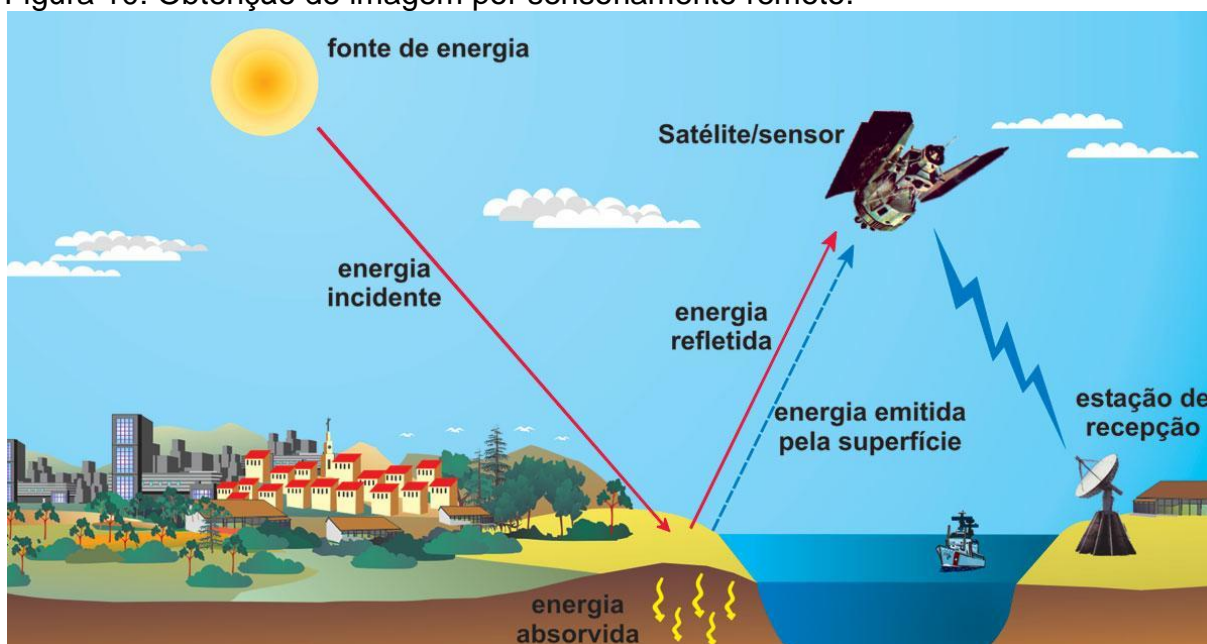
Para a realização de um zoneamento de áreas de risco de um município como é o caso do presente estudo, se faz necessária a obtenção de imagens de alta resolução. Uma alternativa muito utilizada para a aquisição de imagens de áreas específicas e para o monitoramento do risco tem sido o software Google Earth. Apesar de existirem algumas limitações quanto a operações mais complexas de

sensoriamento remoto, ainda assim são muito utilizadas para reconhecimento, planejamento de ações e espacialização do risco (MENEZES, 2014).

Para a obtenção da imagem da superfície terrestre, através do sensoriamento remoto, a energia é radiada pelas partículas atômicas no Sol, que interagem com a atmosfera e a superfície da terra. Após isso, voltam para a atmosfera atingindo o sensor, com isso a energia interage com vários componentes, tais como, ópticos, filtros, emulsões de filmes, ou detectores. Por consequência dessas interações se tem a obtenção da imagem da superfície terrestre, conforme demonstrado na Figura 10 (JANSEN, 2009).

A radiação solar que incide na superfície da terra interage de forma diferente com cada tipo de alvo. Isso é determinado principalmente por causa das diferentes composições físico-químicas dos objetos ou feições terrestres. Com isso, cada alvo terrestre tem sua própria assinatura espectral, absorvendo ou refletindo de modo diferente cada uma das faixas do espectro da luz incidente. Cabe ressaltar que tanto a irradiância que atinge aos alvos, como a radiância dos alvos (parte da energia refletida pelos alvos) podem ser afetadas em suas trajetórias pelos componentes atmosféricos. Áreas nubladas, por exemplo, são impossíveis de serem imageadas por meio da luz solar (FIGUEIREDO, 2005).

Figura 10: Obtenção de imagem por sensoriamento remoto.



Fonte: Bernardes e Suertegaray (2009).

A superfície terrestre é recoberta por aproximadamente 70% de vegetação. Sabe-se que a vegetação é um dos componentes mais importantes dos ecossistemas. O conhecimento das variações das espécies e dos padrões de distribuição das plantas provém importantes informações sobre alterações das características climáticas do local. Assim, diversos pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de sensores e algoritmos de processamento visual e digital de imagens, para extrair importantes informações biofísicas da vegetação a partir de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009).

Ainda conforme Jensen (2009), as paisagens urbanas vêm crescendo em um ritmo acelerado e desorganizado, normalmente desprovida de um desenvolvimento planejado. Com isso, um número significativo de profissionais, instituições públicas e pesquisadores demandam constantemente informações atualizadas sobre a infraestrutura urbana e periurbana. Uma das utilizações do sensoriamento remoto em áreas urbanas é no zoneamento das áreas de riscos, evitando assim que a população ocupem locais impróprios para habitação.

Em um zoneamento de áreas de risco, é comum que a base das principais informações provenha de dados remotos, obtidos por imagens de satélite, fotografias aéreas, imagens de radar, GPS ou varreduras termais. A resolução da imagem é um dos aspectos mais importantes a serem considerados. Ela fornece a informação sobre a menor unidade de representação física espacial fornecida pelo sensor, ou seja, é a menor representação espacial de uma porção do terreno. Ela uniformiza em um número ou cor uma série de objetos presentes nessa unidade, por isso da importância de imagens de alta resolução (SANTOS, 2004).

### **2.5.2 Geoprocessamento**

O geoprocessamento é o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais, que opera sobre bases de dados georreferenciados, para transformá-los em informação relevantes (SILVA, 2009). Dessa forma, a aplicação das técnicas de mapeamento de informações

específicas, dados de geologia, geomorfologia, vegetação, hidrografia, população e solo, que são úteis para questões relativas a deslizamentos, inundações e enxurradas, podem ser organizados em técnicas de geoprocessamento (MARTINS, 2013).

Conforme Moreira (2005), os procedimentos computacionais para análise de dados coletados por sistemas de sensoriamento remoto, surgiram basicamente por duas razões. São elas: acelerar as tarefas manuais realizadas durante a interpretação visual (delimitação de áreas, confecção de mapas, cálculo de área e etc.) e possibilitar que o analista introduza outros tipos de informações e cruzá-las com os padrões espectrais contidos nas imagens, de tal modo que esses padrões se tornem mais facilmente identificados.

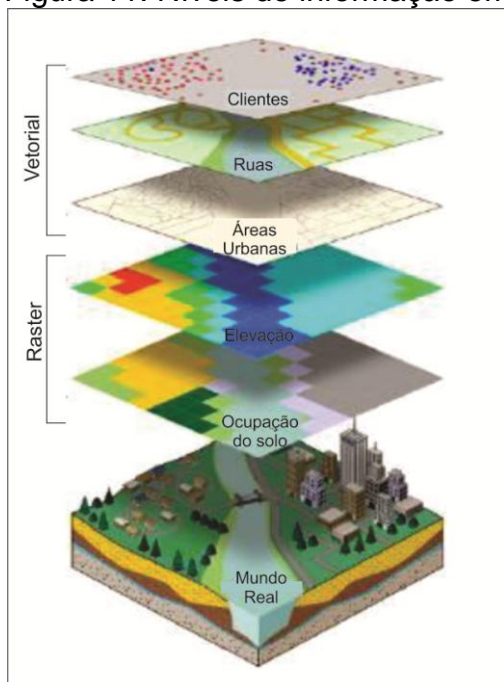
O geoprocessamento tem se aplicado em diversas áreas da ciência, tais como, Cartografia, Geografia, Agricultura e Floresta e a Geologia. Contribuindo assim para estudos de planejamento urbano e rural, meios de transporte, comunicação e energia. As ferramentas utilizadas para realização de um geoprocessamento são compostas por um conjunto denominado de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (MOREIRA, 2005).

O SIG permite inserir e integrar, em uma única base de dados informações espaciais provenientes de diversas fontes (Figura 11). Oferece mecanismo para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georreferenciadas (MOREIRA, 2005).

A aquisição dos dados na forma digital é a mais comum, devido ao baixo custo. A representação digital dessa aquisição pode ser realizada no formato *raster* (matricial) ou *vector* (vetorial). No formato matricial, o espaço é dividido em retângulos (células) ou *pixels*. O vetor é representado por nós (pontos), linhas ou áreas. Esses conjuntos de informações formam os dois tipos de atributos do mapa, sendo eles, arquivos gráficos e não gráficos, conforme demonstrado na Figura 12 (MARTINS, 2013).



Figura 11: Níveis de informação em SIG.



Fonte: Martins (2013).

Figura 12: Representação dos formatos digitais.



Fonte: Autor (2015).

A ferramenta de geoprocessamento é muito importante para a análise de áreas suscetíveis a eventos de deslizamentos, inundações e enxurradas. O principal passo da técnica é a coleta de dados, bem como a construção de um banco de dados espacial, em que relevantes fatores podem ser extraídos e, posteriormente, serem avaliados, usando uma relação de deslizamentos, inundações e enxurradas com fatores que foram catalogados (MARTINS, 2013; ECKHARDT, 2008).

Por consequência dessas formas de captação de dados, é possível estabelecer uma quantificação para o zoneamento de risco, tornando-o, dessa forma, mais viável e palpável do ponto de vista técnico.

## 2.6 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica é uma técnica que permite o entendimento do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. É uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre, possuindo grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo (ZANETTI, 2007). Porém, sabe-se das dificuldades de representar matematicamente todas as relações existentes entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica, dessa forma, a modelagem hidrológica torna-se uma representação aproximada da realidade (RENNÓ; SOARES, 2000).

Para um melhor entendimento dos modelos hidrológicos, é necessário analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico, sendo a água um agente essencial no processo produtivo. O solo pode ser considerado como um reservatório, tendo a água como a principal fonte de entrada do sistema, através da precipitação (RENNÓ; SOARES, 2000). Para a realização de uma modelagem hidrológica, se faz necessário a obtenção de séries históricas de chuvas, obtidas em postos pluviométricos de monitoramento (BERTONI; TUCCI, 2013).

Um dos objetivos de realizar-se uma modelagem hidrológica é estimar o TR (tempo de retorno), que é o inverso da probabilidade com que uma dada variável hidrológica possa ser igualada ou superada, pelo menos uma vez, num ano qualquer. Com os valores das séries históricas adquiridos, deve-se realizar a média das precipitações, com isso, podem-se estimar os valores das precipitações máximas diárias para cada um dos TRs escolhidos. Um dos métodos utilizados é o de Gumbel, que é um dos ajustes de distribuição de probabilidades de valores extremos mais utilizados (BERTONI; TUCCI, 2013).

Conforme Bertoni e Tucci (2013), em uma modelagem hidrológica deve-se ajustar uma equação i-d-f para cada modelo de bacia trabalhada, sendo que a variável intensidade (i) é uma função da duração da chuva (d) e da frequência (f), esta última relacionada ao TR. Para a realização dessa equação, é necessário observar as chuvas intensas durante um período de tempo suficientemente longo e

representativo dos eventos extremos do local. Para um determinado TR, a curva i-d-f estabelece as máximas intensidades da precipitação (i) para cada duração (t), possuindo geralmente a seguinte forma:

$$i = \frac{a \cdot Tr^b}{(t + c)^d} \quad (1)$$

Onde:

i: intensidade, geralmente expressa em mm/h;

Tr: tempo de retorno, em anos;

t: duração da chuva, em minutos;

a, b, c e d são parâmetros que devem ser determinados para cada local.

Também se deve elaborar um hietograma de projeto, que consiste em uma sequência de precipitações capaz de provocar a cheia de projeto, ou seja, a maior enchente para qual a obra deve estar projetada. Dessa forma, tem-se o método Bureau of Reclamation, que conforme Bertoni e Tucci (2013, p. 222):

Este método é utilizado para cálculo da precipitação de projeto do modelo Soil Conservation Service (SCS) e consiste na seguinte sequência: a) determine as precipitações correspondentes a diferentes durações (cerca de seis durações), até o tempo de concentração; b) determine os incrementos de chuva da seguinte forma: 6, 4, 3, 1, 2, 5; a numeração indica a ordem de magnitude. Colocando o maior valor no quarto intervalo, procura-se maximizar o pico do hietograma, já que as chuvas iniciais atendem as perdas por infiltração e depressões de bacia e o incremento maior tende a gerar escoamento superficial.

Outro método é o de Chicago, que segundo Bertoni e Tucci (2013, p. 224), ele distribui no tempo uma precipitação de projeto, baseando-se na utilização das curvas i-d-f do local de interesse, sendo utilizado para pequenas áreas de drenagem. Dessa forma, o hietograma padrão representa uma chuva intensa de curta duração, como parte de uma chuva de longa duração. Para os mesmos autores, “os fatores mais importantes que caracterizam a distribuição temporal da precipitação são: a) volume de precipitação que cai durante o período de chuva intensa; b) precipitação antecedente, e; c) localização do pico de intensidade máxima”.

Um dos modelos hidrológicos mais utilizados é o citado anteriormente, SCS. Trata-se de um modelo do tipo chuva-vazão, com o objetivo de transformar a precipitação em vazão nas sub-bacias estudadas, gerando, na foz de cada uma delas, um hidrograma de saída (BERTONI; TUCCI, 2013). Conforme Guasselli et al. (2015), este método é muito utilizado para a simulação de hidrogramas de cheias de projeto de obras hidráulicas e para a determinação das áreas inundáveis em decorrência de fortes chuvas.

O modelo SCS, segundo Guasselli et al. (2015, p. 11):

Baseia-se em uma equação empírica que calcula as perdas por evapotranspiração e por infiltração, utilizando um parâmetro (CN) definido pelo cruzamento entre o uso e cobertura do solo e os tipos de solo (Equações 2 e 3). A propagação superficial do volume gerado pela separação do escoamento é realizada através de um hidrograma unitário sintético triangular. As Equações 4 e 5 determinam a vazão máxima e o tempo de pico.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

$$q = \frac{2,08 \cdot A}{\frac{D}{2} + t_p} \quad (4)$$

$$t_p = \frac{2,6 L^{0,8} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,7}}{1900 \cdot y^{0,5}} \quad (5)$$

Onde:  $Q$  é o volume superficial acumulado em mm;  $P$  é a precipitação total acumulada em mm;  $I_a$  são as perdas iniciais, estimado em  $0,2S$ ;  $S$  é o armazenamento do solo;  $q$  é a vazão máxima em  $m^3/s$ ;  $A$  é a área de drenagem em  $km^2$ ;  $D$  é o intervalo de tempo em horas;  $t_p$  é o tempo de pico em horas;  $L$  é o comprimento hidráulico em m;  $y$  é a declividade em porcentagem.

Para a propagação da vazão nos trechos de rio, Tucci (2013) cita o modelo Muskingun-Cunge, que é a relação entre armazenamento e vazão, que para uma seção é a relação entre a área e a vazão, ou seja, o princípio do modelo onda cinemática. Este modelo utiliza a equação da continuidade concentrada (Equação 6) e uma relação entre o armazenamento ( $S$ ) e a vazão de saída e entrada do trecho, para simular o escoamento no rio (GUASSELLI et al., 2015).

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t + Q_l \quad (6)$$

Onde:  $I_t$  é o hidrograma de entrada;  $Q_t$  é o hidrograma de saída;  $Q_l$  é a contribuição lateral de todo o segmento de rio.

A simulação hidrológica deve ser desenvolvida em *softwares*, tem-se para essa simulação o *software* desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Universidade Federal de Pelotas, o IPHS1 (GUASSELLI et al., 2015). Após essa modelagem são obtidos os valores de vazão (Q) e de velocidade de escoamento (v), em função do tempo (t). A partir destas informações, é possível calcular a área da seção transversal "molhada" ( $A_s$ ) a partir da Equação 7.

$$A_{s_t} = \frac{Q_t}{v_t} \quad (7)$$

O estudo desenvolvido por Guasselli et al. (2015), teve como objetivo realizar uma modelagem hidrológica aplicada a eventos extremos de precipitação, para espacializar as áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS, em diferentes tempos de retorno (TRs), envolvendo a bacia hidrográfica do rio Paranhana.

Os autores realizaram uma simulação hidrológica de eventos extremos com recorrência (TR) de 10, 50 e 100 anos, através da conjugação de dois modelos hidrológicos, o modelo chuva-vazão SCS para as sub-bacias e o modelo de propagação da onda de cheia Muskingum-Cunge. Em seguida, realizaram a espacialização das áreas suscetíveis às inundações, em Igrejinha, para cada um dos TRs analisados, definindo zonas de baixa, média e alta suscetibilidade. As áreas que foram inundadas com TR igual ou inferior a 10 anos (alta frequência) foram definidas como alta suscetibilidade. As áreas inundadas com TR entre 10 e 50 anos foram definidas como de média suscetibilidade. Já as áreas inundadas com TR entre 50 e 100 anos (baixa frequência) foram definidas como de baixa suscetibilidade.

## **2.7 Estudos realizados com aplicação de geotecnologias para o mapeamento de áreas de inundações, movimentos de massa e zoneamentos**

### **2.7.1 Movimentos de massa**

Riffel e Guasselli (2013) desenvolveram um estudo de suscetibilidade a movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Paranhana, RS. Utilizaram dados do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), unidades geomorfológicas (UG) do IBGE e modelos geomorfológicos (MG), para a elaboração de três mapas, sendo eles, declividade, UG e MG. O mapa de declividade foi dividido em cinco classes de aptidão do uso do solo.

Com o cruzamento dos pontos de ocorrência de movimentos de massa, com os mapas elaborados anteriormente, identificou-se padrões nas ocorrências de movimentos de massa. A declividade foi a que mais influenciou para a ocorrência desses eventos, obtendo um maior peso para a geração do mapa de suscetibilidade, seguido pelos MG e UG. Assim, com os cruzamentos gerou-se um mapa final com três classes, alta, média e baixa suscetibilidade a movimentos de massa (RIFTEL; GUASSELLI, 2013).

Martins (2013) realizou uma análise na área urbana do município de Igrejinha, RS, elaborando um inventário dos deslizamentos que ocorreram e dos locais suscetíveis a esses eventos. Foram utilizados dados geológicos e altimétricos fornecidos pelo município e mapas da Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM). A declividade foi a principal condicionante para definir os locais com maior suscetibilidade a deslizamento.

O município foi dividido em sete zonas, definidas como locais mais suscetíveis a esses eventos, atribuindo como critérios locais que já possuíam registros de deslizamentos e declividades acima de 15° (MARTINS, 2013). Verificou-se que os deslizamentos ocorriam em declividades entre 18° e 24°. O autor conclui que áreas com maior grau de declividade não devem ser habitadas, deve-se respeitar declividades acima de 30% (aproximadamente 17°) (MARTINS, 2013).

### **2.7.2 Inundações**

Oliveira, Saldanha e Guasselli (2010), realizaram uma especialização na bacia hidrográfica do rio Caí, RS, analisando as inundações através de dados fluviométricos e geotecnologias. Utilizaram séries históricas de cotas, bases digitais planialtimétricas contínuas da DSG e dados SRTM. Realizaram o processamento das séries históricas de cotas para a obtenção do TR, espacialização da inundação de 2007 e modelagem das áreas inundadas para identificar as áreas atingidas por inundações.

Dessa forma, obtiveram um TR superior a 25 anos para as áreas suscetíveis a inundações com a espacialização da inundação de 2007, e dois mapas demonstrando as áreas das modelagens de inundação, baseando-se em dados do SRTM e DSG. Comparando as modelagens de inundação com a espacialização realizada da inundação de 2007, verificaram que a modelagem realizada com bases DSG obteve um melhor resultado (OLIVEIRA, SALDANHA; GUASSELLI, 2010).

### **2.7.3 Zoneamento de áreas de risco a inundações**

Menezes (2014) realizou um zoneamento de risco a inundações na área urbana de Santa Cruz do Sul, RS. Utilizou curvas de nível do município com equidistância de 5 metros. Elaborou mapa de declividade, determinando as áreas de até 2% de declividade e próximas aos rios como planícies de inundação. O mapa de risco a inundações surgiu através do cruzamento de áreas suscetíveis com imagens de satélite de alta resolução, dividido em três graus de perigo (P), baixo, médio e alto. Elaborou um mapa de vulnerabilidade (V), dividido em baixa, média e alta vulnerabilidade.

Com o cruzamento dos mapas elaborados anteriormente, obteve o mapa de risco a inundações, estabelecendo quatro graus de risco, da seguinte maneira: R1 - Risco Baixo:  $P1 \times V1$  e  $V2$ ; R2 - Risco Médio:  $P1 \times V3$   $P2 \times V1$  e  $V2$   $P3 \times V1$ ; R3 -

Risco Alto:  $P2 \times V3$   $P3 \times V2$ ; R4 - Risco Muito Alto:  $P3 \times V3$ . Por fim, o autor separou o mapa por bairros, identificando o risco em locais diferentes do município, em uma escala mais detalhada. O estudo obteve um bom resultado, permitindo ao município uma melhor gestão na ocupação de suas áreas (MENEZES, 2014).

#### **2.7.4 Estudo semelhante realizado na mesma área de estudo e diferenças metodológicas entre os dois trabalhos**

Porcher (2012) realizou um estudo na mesma área do presente trabalho. Delimitando as áreas vulneráveis a deslizamentos e inundações e quantificação da infraestrutura presente nestas áreas, através de geotecnologias. Com cartas topográficas digitalizadas da DSG, foram obtidas as curvas de nível (equidistantes 20 metros), malha rodoviária e hidrografia vetorizadas.

Para a criação do mapa de “vulnerabilidade a deslizamentos”, foram utilizadas curvas de nível, gerando o mapa de declividade, e definindo as declividades com “potencial de risco de deslizamento”, conforme a bibliografia de Santos (2007), que é definida da seguinte maneira, baixo risco (0-16%), médio risco (16,01-30%), alto risco (30,01-60%) e muito alto risco (acima de 60%) (PORCHER, 2012).

Para geração do mapa de área de inundação foi utilizado um GPS, registrando pontos que a inundação de 04 de janeiro de 2010 atingiu, assim gerando o mapa de inundação. Foram identificadas as construções do município, cruzando as informações com os mapas de deslizamentos e inundações, possibilitando quantificar as estruturas presentes em áreas vulneráveis. Foram identificadas construções em áreas com maior risco a esses eventos, dessa forma faz-se necessário um planejamento e controle das habitações (PORCHER, 2012).

Uma das diferenças entre o estudo realizado por Porcher (2012) e o presente trabalho, é que serão utilizados alguns dados mais detalhados do município. Serão usadas curvas de nível fornecidas pela Prefeitura de Marques de Souza com equidistância de 1 metro na área urbana, proporcionando assim uma melhor precisão para a demarcação das áreas de inundação e enxurrada.



Outra diferença se refere à questão metodológica. Para definir níveis de suscetibilidade às inundações e enxurradas, será realizada uma modelagem hidrológica, de maneira a simular três cenários de precipitações extremas, com diferentes TRs (tempos de retorno) para o município. Após será realizado o mapeamento das áreas inundáveis nos três cenários simulados (TRs de 10, 50 e 100 anos), divididos em baixa, média e alta suscetibilidade a inundações e enxurradas.

Para a identificação das áreas suscetíveis a movimentos de massa será realizado um inventário desses eventos, identificando locais de ocorrência. Com os locais identificados, será realizado um levantamento físico do local de cada evento com auxílio de bases cartográficas digitais e técnicas de geoprocessamento. Será realizada uma análise de frequência das ocorrências em relação a diferentes intervalos para cada parâmetro físico. Após, será realizado um cruzamento dos parâmetros, verificando assim o que mais influenciou para a ocorrência dos eventos. Por fim, será realizado um cruzamento entre as bases que mais influenciam nos movimentos de massa através de álgebra de mapas, dividindo o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa em três classes, sendo elas de baixa, média e alta suscetibilidade.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Caracterização da área de estudo**

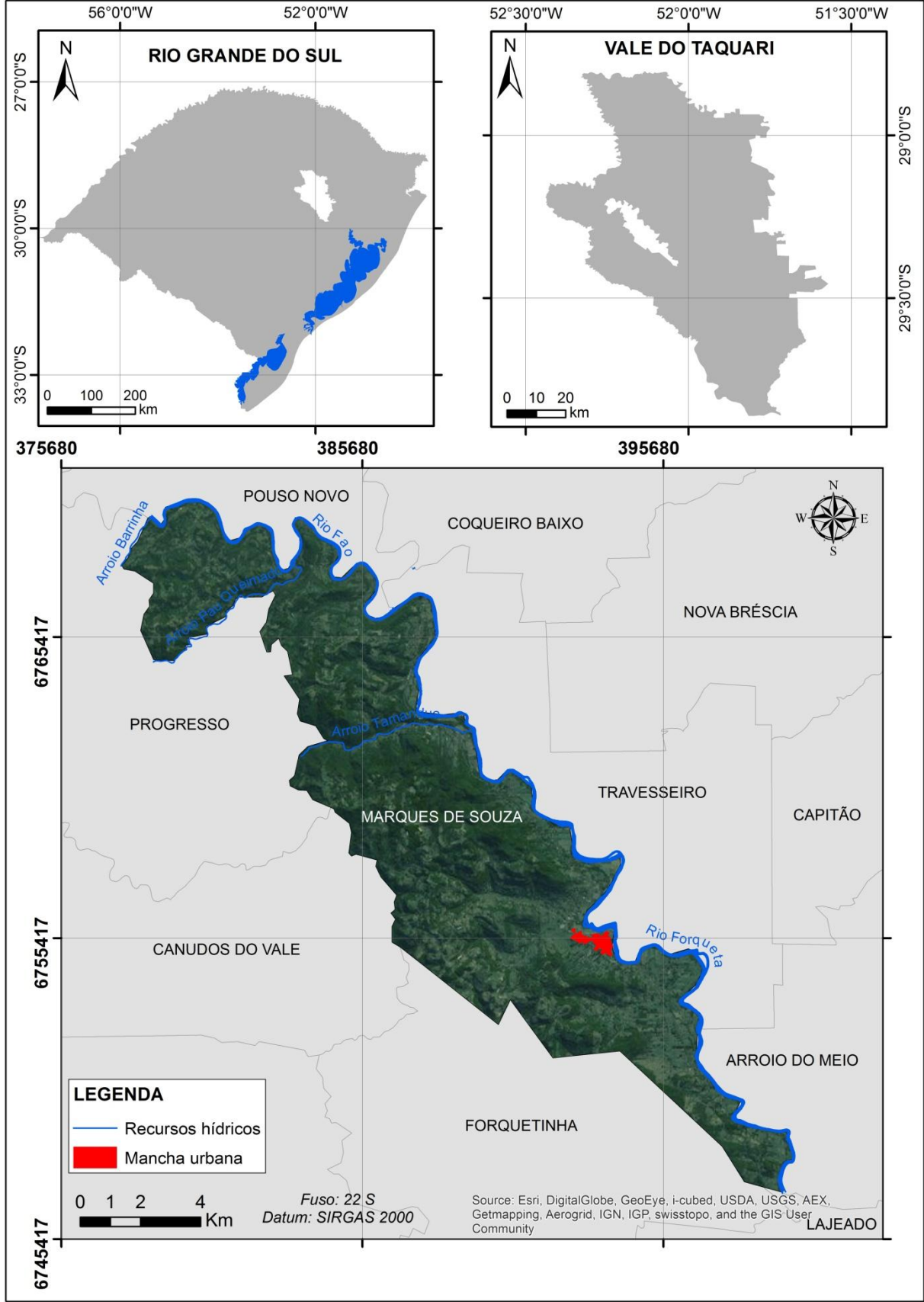
#### **3.1.1 Localização da área de estudo**

O município de Marques de Souza está localizado no centro-leste do estado do Rio Grande do Sul, na zona alta da região geopolítica do Vale do Taquari, distante 130 km de Porto Alegre (Figura 13). Sua área territorial é de 125,176 km<sup>2</sup> e uma população de 4.068 habitantes (CENSO 2010). Sua economia é voltada principalmente à produção primária, destacando-se os setores avícola, suinícola e a pecuária leiteira, além da produção de grãos (IBGE, 2010).

Seus limites territoriais ao sul são com os municípios de Forquethina e Lajeado, a oeste com os municípios de Progresso e Canudos do Vale, ao norte com Pouso Novo e a leste com os municípios de Arroio do Meio e Travesseiro, conforme demonstrado na Figura 13.

Marques de Souza emancipou-se politicamente de Lajeado em 28 de dezembro de 1995, com o decreto assinado pelo governador da época, senhor Antônio Britto Filho, sendo que a Comissão de Emancipação foi presidida pelo senhor Nilvo Rubem Ritter, tendo como vice o senhor Dorival Künzel (IBGE, 2010).

Figura 13: Mapa de localização do município de Marques de Souza.



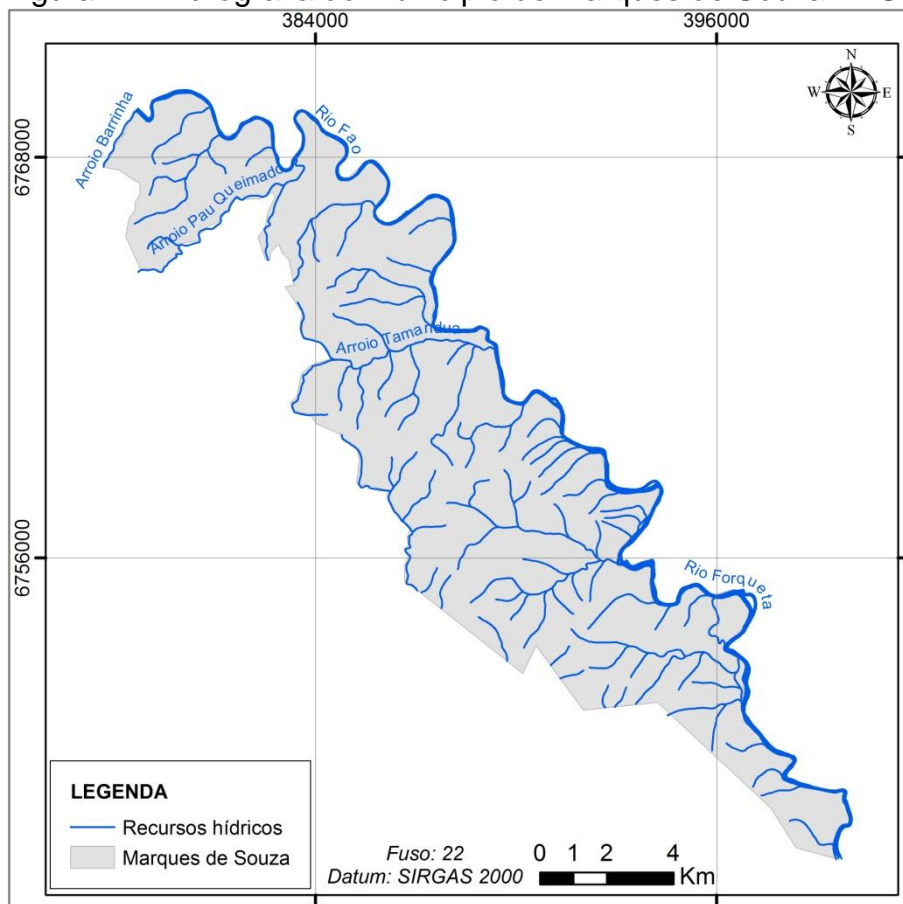
Fonte: Autor, adaptado IBGE.

### 3.1.2 Características físicas

#### 3.1.2.1 Hidrografia

O município de Marques de Souza pertence à bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, e a sub-bacia hidrográfica do rio Forqueta. É composto por diversos rios e arroios, conforme verificado na Figura 14. É banhado em toda a sua extensão pelos rios Fão e Forqueta, possuindo dois arroios que cortam o município, o arroio Tamanduá e o arroio Pau Queimado, e o arroio Barrinha que divide o município ao norte com a cidade de Progresso.

Figura 14: Hidrografia do município de Marques de Souza - RS.



Fonte: Adaptado de Hasenack e Weber (2010).

### 3.1.2.2 Geomorfologia

De acordo com Souza et al. (2013), para caracterizar geomorfologicamente uma área é preciso analisar o comportamento do relevo e as formas que são geradas tanto por mecanismos endógenos (tectônica e magmatismo) quanto exógenos (erosão). Processos endógenos como o vulcanismo tendem elevar o relevo, gerando áreas altas enquanto que os exógenos tendem a rebaixar progressivamente o relevo. Assim, a descrição geomorfológica explica a evolução do relevo.

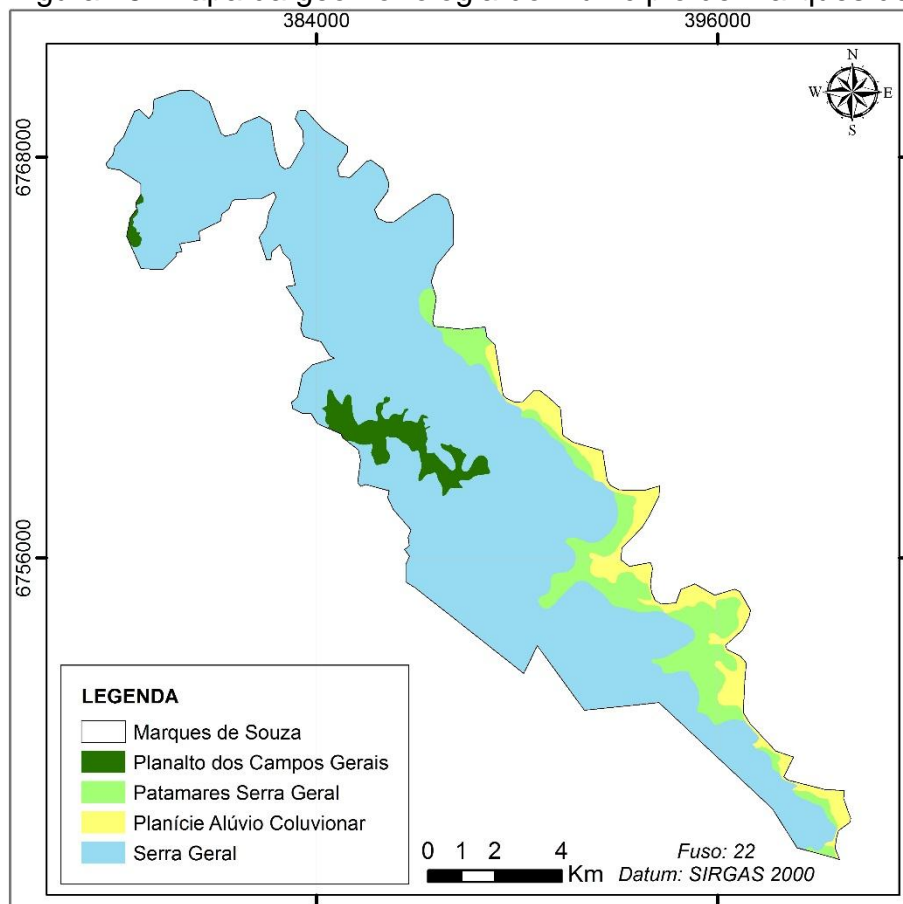
Oliveira et al. (2015), desenvolveram um estudo referente a geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, onde está inserido o município de Marques de Souza. Verificou-se que a área do município é composta por quatro Unidades Geomorfológicas (UG), sendo elas: a Serra Geral, Planalto dos Campos Gerais, Patamares da Serra Geral e Planície Alúvio Coluvionar. A UG da Serra Geral apresenta um relevo com formas bastante abruptas com vales fluviais bem aprofundados, o desnível pode atingir alturas superiores a 400 metros, tendo muitos topos de morros angulares ou estreitos. O limite superior da UG Serra Geral é definido pelas linhas de escarpa erosiva.

A UG Planalto dos Campos Gerais, caracteriza-se por um relevo de plano a ondulado, representada por topos de morros tabulares preferencialmente. Os Patamares da Serra Geral constituem-se nas áreas mais baixas do Planalto das Araucárias, com predominância de declives menos acentuados, sendo facilmente separados da UG Serra Geral pela linha de ruptura de declive relacionada à escarpa erosiva (OLIVEIRA et al., 2015).

A UG Planície Alúvio Coluvionar corresponde a uma superfície plana, posicionada no nível inferior da bacia do rio Taquari-Antas, nas adjacências das UGs Depressão do Rio Jacuí e Patamares da Serra Geral. Esta UG representa 3,1% desta bacia (819 km<sup>2</sup>). A altitude média deste compartimento é de 24 m, sendo que 90% da UG apresentam altitudes entre 1 e 45 m. Quanto às declividades, 90% da área de planície apresentam declividades inferiores a 6,42%, com média de 2,2% (OLIVEIRA et al., 2015).

Na Figura 15 são demonstradas as unidades geomorfológicas do município de Marques de Souza.

Figura 15: Mapa da geomorfologia do município de Marques de Souza - RS.



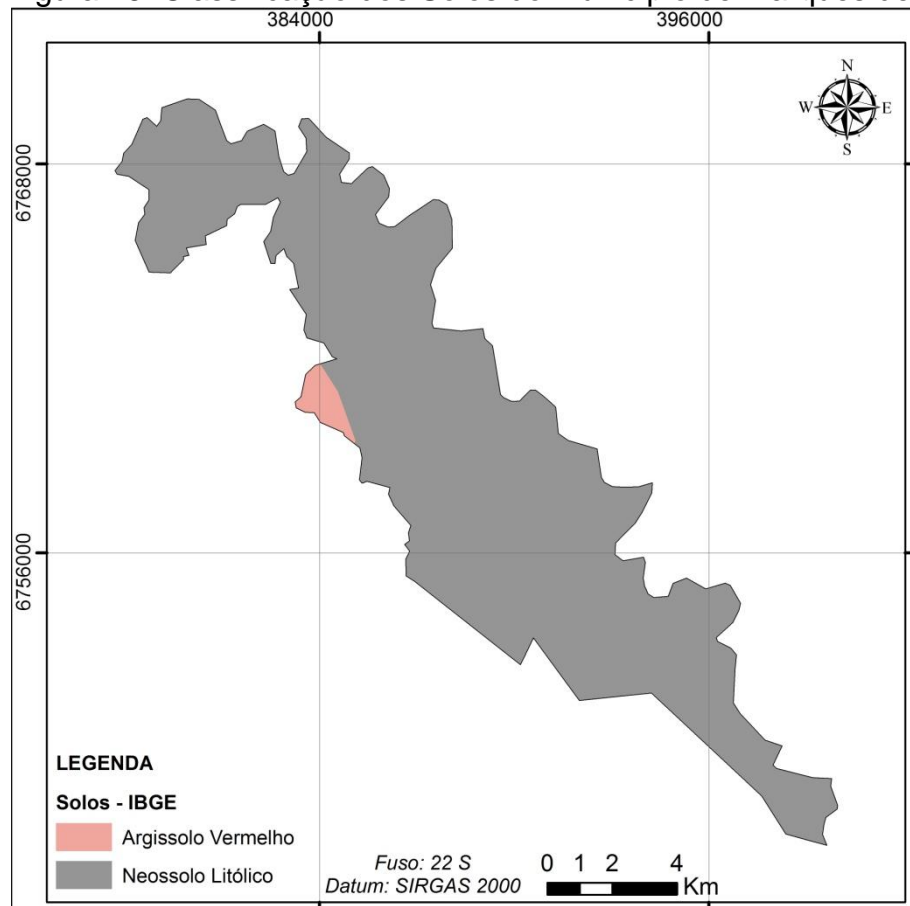
Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2015).

### 3.1.2.3 Solos

Conforme dados do IBGE, o município de Marques de Souza possui dois tipos de solos, o Argissolo vermelho e Neossolo Litólico (Figura 16), sendo que aproximadamente 98% de seu território é composto pelo Neossolo Litólico. O Argissolo vermelho tem sua profundidade variável, “mas em geral são pouco profundos e profundos. São juntamente com os Latossolos, os solos mais expressivos do Brasil, sendo verificados em praticamente todas as regiões”. O Neossolo Litólico é constituído por material mineral ou material orgânico pouco espesso, ocorrendo em diversas partes do Brasil, de forma dispersa em ambientes

específicos, em relevos muito acidentados de morrarias e serras (IBGE, 2007, p. 276).

Figura 16: Classificação dos Solos do município de Marques de Souza - RS.



Fonte: Adaptado IBGE.

### 3.1.2.4 Geologia

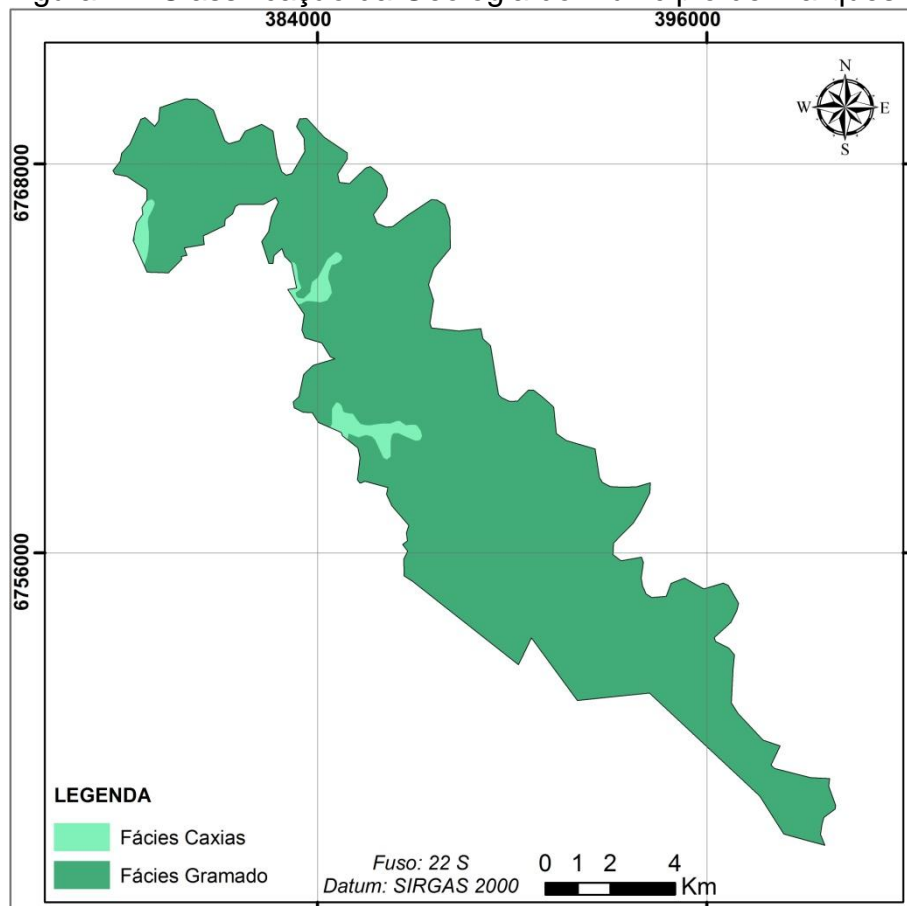
Conforme dados do IBGE, o município de Marques de Souza é composto por rochas pertencentes à Formação Serra Geral, mais especificamente Fácies Gramado e Caxias (Figura 17). Segundo Hoff et al. (2007, p. 235) as Fácies Gramado e Caxias são:

**Fácies Gramado:** derrames basálticos, datados de 132 milhões de anos, do tipo granulares finos a médios, melanocráticos, contendo níveis de vesículas bem desenvolvidos no topo e incipientes na base dos derrames, normalmente preenchidas por zeolitas.

**Fácies Caxias:** de idade 131 milhões de anos é caracterizado por derrames de composição intermediária a ácida (riodacítica), mesocráticos, granulares finos a microfaneríticos, tendo horizontes superiores com disjunção tabular

bem desenvolvida, raras vesículas preenchidas por sílica. As partes centrais dos derrames se apresentam maciços, podendo apresentar estruturas de fluxo laminar e dobras.

Figura 17: Classificação da Geologia do município de Marques de Souza - RS.



Fonte: Adaptado IBGE.

### 3.2 Materiais

Para a elaboração do presente estudo serão utilizados os seguintes dados, softwares e equipamentos, listados abaixo:

Dados:

- Curvas de nível com equidistância de 1 metro (área urbana), fornecido pela Prefeitura Municipal de Marques de Souza;
- Bases planialtimétricas contínuas, adquiridas da base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul na escala 1:50.000, realizada pelo



Laboratório de Geoprocessamento da UFRGS, com coordenação de Heinrich Hasenack e Eliseu Weber;

- Dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizados no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) e interpolados para uma resolução espacial de 30 metros (VALERIANO, 2005; 2008);
- Base de dados do IBGE.

Softwares:

- Google Earth Pro;
- ArcGis 10.2;
- Quantum Gis 2.6;
- Corel Draw X7;
- Microsoft Excel 2010.

### **3.3 Métodos**

#### **3.3.1 Organização de um banco de dados georreferenciado**

Organizou-se um banco de dados utilizando as bases digitais planialtimétricas contínuas da DSG para a obtenção da hidrografia e sistema viário do município, e bases vetoriais contínuas fornecidas pela Prefeitura Municipal de Marques de Souza do perímetro urbano, extraindo as curvas de nível com equidistância de 1 metro. Após, com as curvas de nível com equidistância de 1 metro (área urbana) e dados do SRTM (área rural), elaborou-se o MDE (Modelo Digital de Elevação). Optou-se por utilizar os dados do SRTM, pois pode-se aplicar essa mesma metodologia para qualquer região do país, frisando que as curvas de nível da DSG não estão vetorizadas para todo o Brasil.

Para a elaboração do MDE utilizou-se a ferramenta *Topo to raster* no software ArcGis 10.2. As curvas com equidistância de 1 metro estão disponíveis somente para a área urbana do município. Logo, foi necessário complementar esses dados

com outra fonte de informação altimétrica para as demais áreas do município. No caso, foram utilizados os dados SRTM apenas para as áreas rurais. Os dois conjuntos de dados foram compatibilizados e interpolados conjuntamente pelo método *Topo to Raster*, dessa forma, gerando um MDE para toda área do município. A escolha dessa ferramenta se faz pelo fato dela se diferenciar de outros interpoladores, pois considera as linhas de drenagem, o que resulta numa superfície hidrologicamente correta, aspecto essencial para a modelagem das áreas de inundação (OLIVEIRA, SALDANHA; GUASSELLI, 2010).

Para a organização do banco de dados dos movimentos de massa, utilizaram-se as cartas de declividade, altitude, orientação do relevo e forma de terreno, disponibilizados no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) (VALERIANO, 2005; 2008), a geologia e solos foram obtidos do CPRM e a geomorfologia e uso da terra do IBGE, para a região em estudo.

### **3.3.2 Realização da modelagem hidrológica na bacia do rio Forqueta para geração de um mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações**

Elaborou-se uma modelagem hidrológica para a bacia do rio Forqueta, com a finalidade de gerar um mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações, utilizando o mesmo método proposto por Guasselli et al. (2015), onde os autores definiram os TRs conforme o Quadro 3.

Dessa forma, definiu-se como áreas de alta suscetibilidade aquelas atingidas pelas águas com maior frequência, como é o caso dos TRs inferiores a 10 anos. Os locais atingidos com uma frequência entre 10 e 50 anos, foram considerados de média suscetibilidade, locais atingidos com frequência entre 50 e 100 anos como áreas de baixa suscetibilidade e locais com TR maior que 100 anos como áreas não suscetíveis. Essas definições foram realizadas com base na recorrência dos eventos pluviométricos, ou seja, uma área que tem a possibilidade de ser atingida a cada 10 anos por uma inundação, encontra-se mais suscetível que uma área que é inundada

a cada 50 anos, ou com uma frequência ainda menor, que é o caso de ocorrer a cada 100 anos.

Quadro 3: Critérios utilizados para a divisão da suscetibilidade a enxurradas e inundações na área de estudo.

Alta suscetibilidade	TR até 10 anos
Média suscetibilidade	TR entre 10 e 50 anos
Baixa suscetibilidade	TR entre 50 e 100 anos
Áreas não suscetíveis	TR > 100 anos

Fonte: Autor (2015).

Primeiramente, elaborou-se hietogramas de projeto, com TRs de 10, 50 e 100 anos, a partir de uma equação do tipo PDF (precipitação-duração-frequência), ajustada para a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, onde está inserida a Sub-bacia do rio Forqueta. A equação do tipo PDF (8) foi extraída de um estudo realizado por Sampaio (2011), onde a autora gerou equações do tipo PDF e i-d-f para todas as bacias hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul.

$$P = T^d (at + b \ln(1 + ct)) \quad (8)$$

Onde:  $P$  é a precipitação;  $T$  é o tempo de retorno;  $t$  é o tempo de concentração;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , e  $d$  são os coeficientes da equação.

Para a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas os coeficientes obtidos para a equação seguem conforme o Quadro 4.

Quadro 4: Coeficientes da equação do tipo PDF, para a bacia do rio Taquari-Antas.

$a$	$b$	$c$	$d$
0,0061	14,9304	0,2283	0,1331

Fonte: Adaptado Sampaio (2011).

Para a geração do hietograma de projeto, utilizou-se o método de Chicago, proposto por Keifer e Chu (1957). No estudo considerou-se a duração da chuva igual ao tempo de concentração. Dessa forma, calculando o tempo de concentração ( $t_c$ ) da bacia hidrográfica do rio Forqueta, através do método de Kirpich (KIRPICH, 1940), com a utilização da equação 9, obtendo assim, um tempo de concentração para a bacia hidrográfica do rio Forqueta de aproximadamente 22 horas.

$$tc = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (9)$$

Onde:  $tc$  é o tempo de concentração em minutos;  $L$  é o comprimento do rio principal em km;  $H$  é o desnível altimétrico em metros.

Com a obtenção do tempo de concentração da bacia hidrográfica do rio Forqueta gerou-se o hietograma de projeto, conforme relatado anteriormente, através do método de Chicago, que consiste na aplicação da equação 8, onde dividiu-se o  $tc$  de hora em hora, gerando assim 22 intervalos de chuva. Em seguida, com a aplicação da equação 8 obteve-se os valores de chuva acumulada para os diferentes TRs, conforme apresentados no Quadro 5.

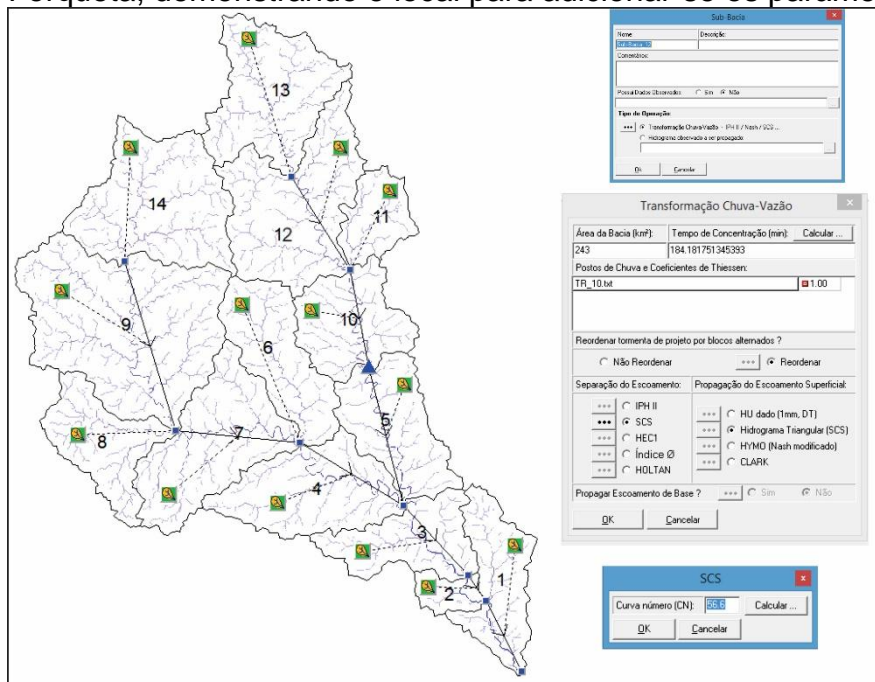
Quadro 5: Chuva acumulada para os diferentes TRs da bacia hidrográfica do rio Forqueta.

Intervalos	t (minutos)	TRs		
		10 anos	50 anos	100 anos
1	60	55,02	68,16	74,75
2	120	68,87	85,33	93,57
3	180	77,36	95,83	105,10
4	240	83,57	103,53	113,54
5	300	88,52	109,66	120,26
6	360	92,66	114,80	125,90
7	420	96,25	119,25	130,77
8	480	99,43	123,19	135,09
9	540	102,30	126,74	138,99
10	600	104,92	129,98	142,54
11	660	107,34	132,98	145,83
12	720	109,59	135,77	148,89
13	780	111,70	138,38	151,76
14	840	113,69	140,85	154,46
15	900	115,58	143,19	157,03
16	960	117,38	145,42	159,48
17	1020	119,10	147,55	161,82
18	1080	120,75	149,60	164,06
19	1140	122,34	151,57	166,22
20	1200	123,88	153,47	168,30
21	1260	125,36	155,31	170,32
22	1320	126,80	157,09	172,27

Fonte: Autor (2015).

Os parâmetros utilizados para elaboração da modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Forqueta, como área de drenagem, comprimento do rio principal, desnível altimétrico, *Curve Number*, extensão do canal/rio, cota do canal à montante, cota do canal à jusante, profundidade do canal, largura média do canal, coeficiente de rugosidade de Manning, altura da planície de inundação, largura média da planície de inundação e coeficiente de rugosidade da planície de inundação foram obtidos a partir de um estudo recente, realizado por Da Cas (2015), onde o autor subdividiu a bacia hidrográfica do rio Forqueta em 14 sub-bacias, conforme demonstrado nas Figuras 18 e 19, e os valores dos parâmetros para cada sub-bacia estão apresentados nos Quadros 6 e 7.

Figura 18: Imagem extraída do *software* IPHS1, com a bacia hidrográfica do rio Forqueta, demonstrando o local para adicionar-se os parâmetros do modelo SCS.

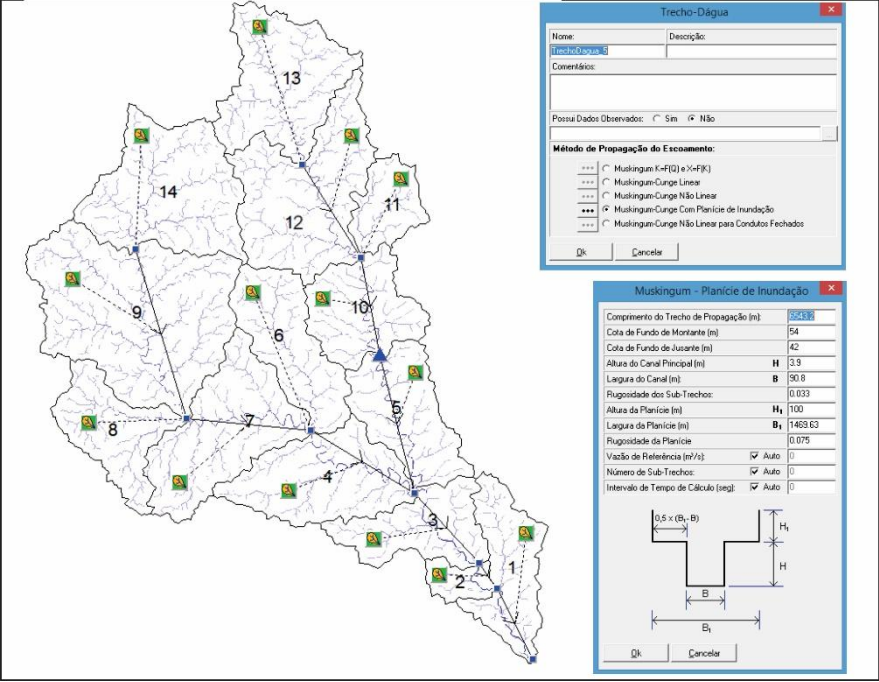


Fonte: Adaptado de IPHS1 (2015).

Na etapa seguinte, realizou-se a simulação hidrológica, que compreende a simulação de três eventos extremos de precipitação aplicados na bacia hidrográfica do rio Forqueta. O modelo do tipo chuva-vazão que se utilizou foi o SCS, apresentado pelo *Soil Conservation Service*, que consiste na obtenção de um hidrograma do escoamento superficial na foz das sub-bacias. Em seguida, para a propagação da vazão nos trechos de rio utilizou-se o modelo Muskingum-Cunge. Para a simulação hidrológica dos TRs de 10, 50 e 100 anos, utilizou-se o *software* IPHS1, inserindo a representação das sub-bacias e dos segmentos de rio e os

parâmetros de entrada dos dois modelos hidrológicos utilizados (SCS e Muskingum-Cunge), conforme demonstrado na Figuras 19 e 20.

Figura 19: Imagem extraída do software IPHS1, com a bacia hidrográfica do rio Forqueta, demonstrando o local para adicionar-se os parâmetros do modelo Muskingum-Cunge.



Fonte: Adaptado de IPHS1 (2015).

Quadro 6: Valores referentes ao comprimento de rio, área, desnível altimétrico e CN para as Sub-bacias do rio Forqueta.

Bacias	Comprimento do rio principal (Km)	Área (Km²)	Desnível Altimétrico (m)	CN utilizado
1	11,42	121,78	548,00	58,04
2	6,54	31,84	469,00	63,01
3	15,51	122,00	631,00	56,48
4	26,55	182,57	618,00	56,40
5	29,32	146,83	660,00	56,63
6	28,28	146,21	629,00	54,58
7	24,28	209,57	591,00	54,84
8	23,21	125,52	473,00	57,33
9	31,39	382,19	547,00	54,85
10	22,68	134,66	571,00	54,82
11	16,43	70,59	436,00	55,93
12	21,54	243,00	475,00	55,19
13	30,57	196,62	341,00	54,34
14	25,67	238,50	349,00	54,81

Fonte: Adaptado de Da Cas (2015).

Quadro 7: Valores das Sub-bacias do rio Forqueta, para utilização no modelo de Muskingum-Cunge.

Bacias/trechos	Comprimento em Km	Comprimento em m	Largura média (B)	Cota do canal montante (ctm)	Cota do canal jusante (ctj)
1	11,42	11421,18	88,88	42,00	27,00
2	6,54	6543,16	90,79	54,00	42,00
3	15,51	15510,98	87,97	72,00	54,00
4	26,55	26548,48	75,00	146,00	76,00
5	29,32	29320,82	54,67	208,00	78,00
7	24,28	24281,59	65,73	229,00	146,00
9	31,39	31394,21	45,93	427,00	229,00
10	22,68	22678,69	59,86	340,00	208,00
12	21,54	21539,30	32,72	476,00	340,00
Bacias/trechos	Profundidade do canal (Z)	Manning canal (N)	Altura da planície (Z1)	Largura da planície de inundação (B1)	Manning planície (N1)
1	3,90	0,03	100,00	2020,34	0,08
2	3,90	0,03	100,00	1469,63	0,08
3	3,80	0,03	100,00	842,94	0,08
4	3,80	0,04	100,00	224,99	0,13
5	3,80	0,04	100,00	164,02	0,13
7	3,60	0,04	100,00	197,19	0,13
9	3,60	0,04	100,00	91,86	0,13
10	3,40	0,04	100,00	119,72	0,13
12	3,40	0,04	100,00	65,44	0,13

Fonte: Da Cas (2015).

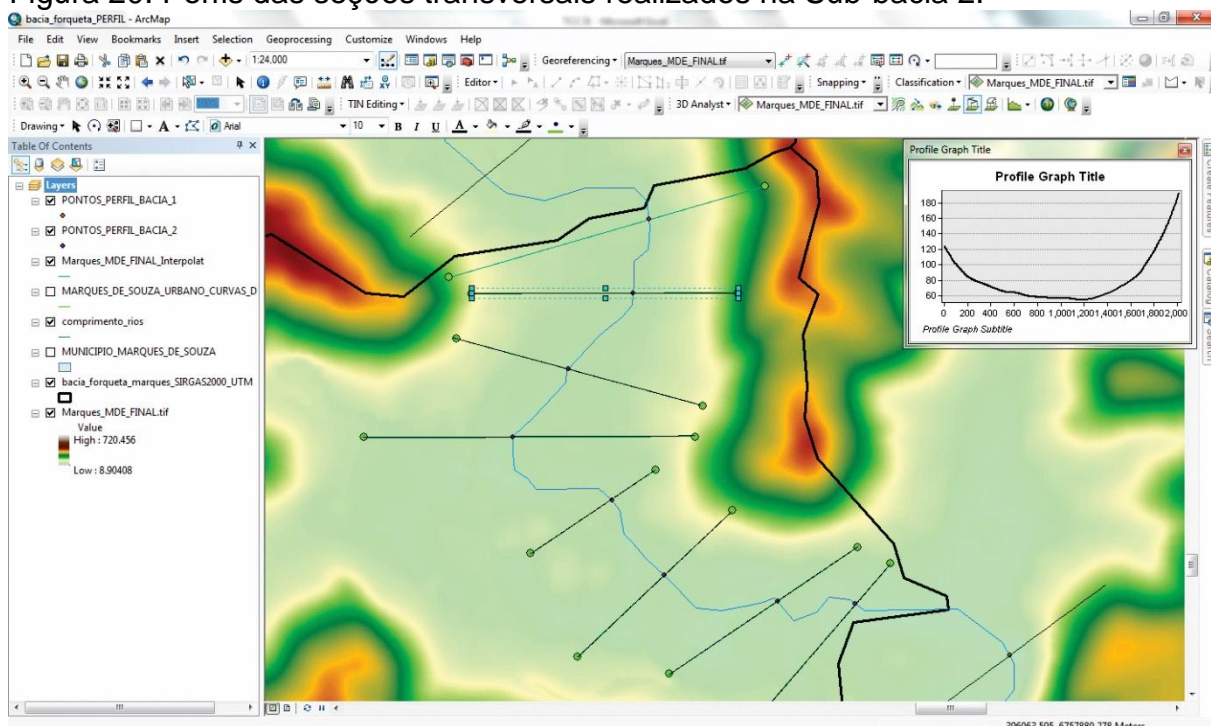
Dessa forma, obteve-se em cada trecho de rio um hidrograma de saída, incluindo informações sobre a velocidade de propagação da onda de cheia. Posteriormente, para a elaboração do mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações foram utilizadas as cotas máximas obtidas em cada trecho de rio que corresponde à área de estudo. Dessa forma, aplicou-se a equação 10, com ela é possível calcular a área da seção transversal "molhada" ( $As$ ).

$$As_t = (H \cdot B) + ((H1 - H) \cdot B1) \quad (10)$$

Onde: H é a altura do canal no trecho do rio; B é largura do canal; H1 é cota máxima para determinada chuva de projeto; B1 é a largura da planície de inundação.

Sabendo-se a área molhada da seção transversal, a cota atingida (C) pode ser obtida através do perfil topográfico das seções transversais. Para a realização dos perfis das seções transversais utilizou-se o *software* ArcGis 10.2, onde inseriu-se o MDE elaborado para a área de estudo, e para cada trecho de rio realizou-se oito perfis, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20: Perfis das seções transversais realizados na Sub-bacia 2.



Fonte: Autor (2015).

Por meio dos valores obtidos em cada perfil transversal (x e y), é possível identificar a área da seção transversal molhada para cada cota atingida. Para esse cálculo, criou-se uma planilha no Excel, onde na primeira coluna foram adicionados os valores de x (deslocamento horizontal sobre a linha traçada) e na segunda coluna os valores de y (deslocamento vertical, com valores ordenados de forma crescente). Em seguida, na terceira coluna realizou-se a diferença entre as cotas (valores de y), e na quarta coluna foi realizado o cálculo da área acumulada da seção transversal para uma determinada cota, por meio da multiplicação entre os valores das diferenças das cotas e os valores da coluna x, somando-se com a área molhada na cota anterior (linha anterior). Dessa forma é obtida a área da seção transversal para cada cota (Figura 21).



Uma vez que é conhecida a área molhada, considerando os resultados da simulação hidrológica, é possível estimar a cota altimétrica atingida pelas águas. Na planilha Excel, fazendo-se o caminho inverso, busca-se a cota altimétrica aproximada (y) que corresponde a uma dada área da seção transversal. Esse procedimento foi realizado por interpolação linear, conforme mostra o equacionamento da Figura 21.

Figura 21: Planilha do Excel demonstrando a forma de calcular a área da seção transversal e cota de inundação.

PERFIL 1 BACIA 2				TR DE 100 ANOS	
X	y	dy	ÁREA		
819.7102257	53.3291	0.0564	1978.68102	dA	85.05593
824.7084588	53.3935	0.0644	2031.792245	dA1	43.12
829.7066919	53.4311	0.0376	2062.989216	%	0.50697
834.704925	53.4801	0.049	2103.889758	dC	0.0978
839.7031581	53.5646	0.0845	2174.844675	dCx%	0.049582
844.7013911	53.5789	0.0143	2186.923904	COTA	53.87 m
849.6996242	53.6851	0.1062	2277.162005		
854.6978573	53.6973	0.0122	2287.589318	dA	70.95492
859.6960904	53.7766	0.0793	2355.763218	dA1	13.79
864.6943235	53.8253	0.0487	2397.873832	%	0.194296
869.6925566	53.9231	0.0978	2482.929764	dC	0.0845
874.6907896	53.9595	0.0364	2514.768509	dCx%	0.016418
879.6890227	53.9826	0.0231	2535.089325	COTA	53.50 m
884.6872558	54.1221	0.1395	2658.503197		
889.6854889	54.1571	0.035	2689.642189	dA	26.63958
894.683722	54.1968	0.0397	2725.161133	dA1	8.93
899.6819551	54.2575	0.0607	2779.771828	%	0.335356
904.6801881	54.401	0.1435	2909.593435	dC	0.0378
909.6784212	54.4198	0.0188	2926.695389	dCx%	0.012676
914.6766543	54.4488	0.029	2953.221012	COTA	52.32 m
919.6748874	54.5691	0.1203	3063.857901		
924.6731205	54.6534	0.0843	3141.807845		
929.6713536	54.6535	0.0001	3141.900812		
934.6695866	54.811	0.1575	3289.111272		

TR DE 100 ANOS	
H	3.9 m
B	90.8 m
Cota IPHS1	5.32 m
B1	1469.63 m
Dif cotas	1.42 m
Área inundável	2086.875 m²
Área do canal	354.12 m²
Soma das áreas	2440.99 m²

$$dA = 2482,929764 - 2397,873832$$

$$dA1 = 2440,99 - 2397,873832$$

$$\% = \frac{43,12}{85,05593}$$

$$dC = 53,9231 - 53,8253$$

$$dCx\% = 0,0978 \times 0,50697$$

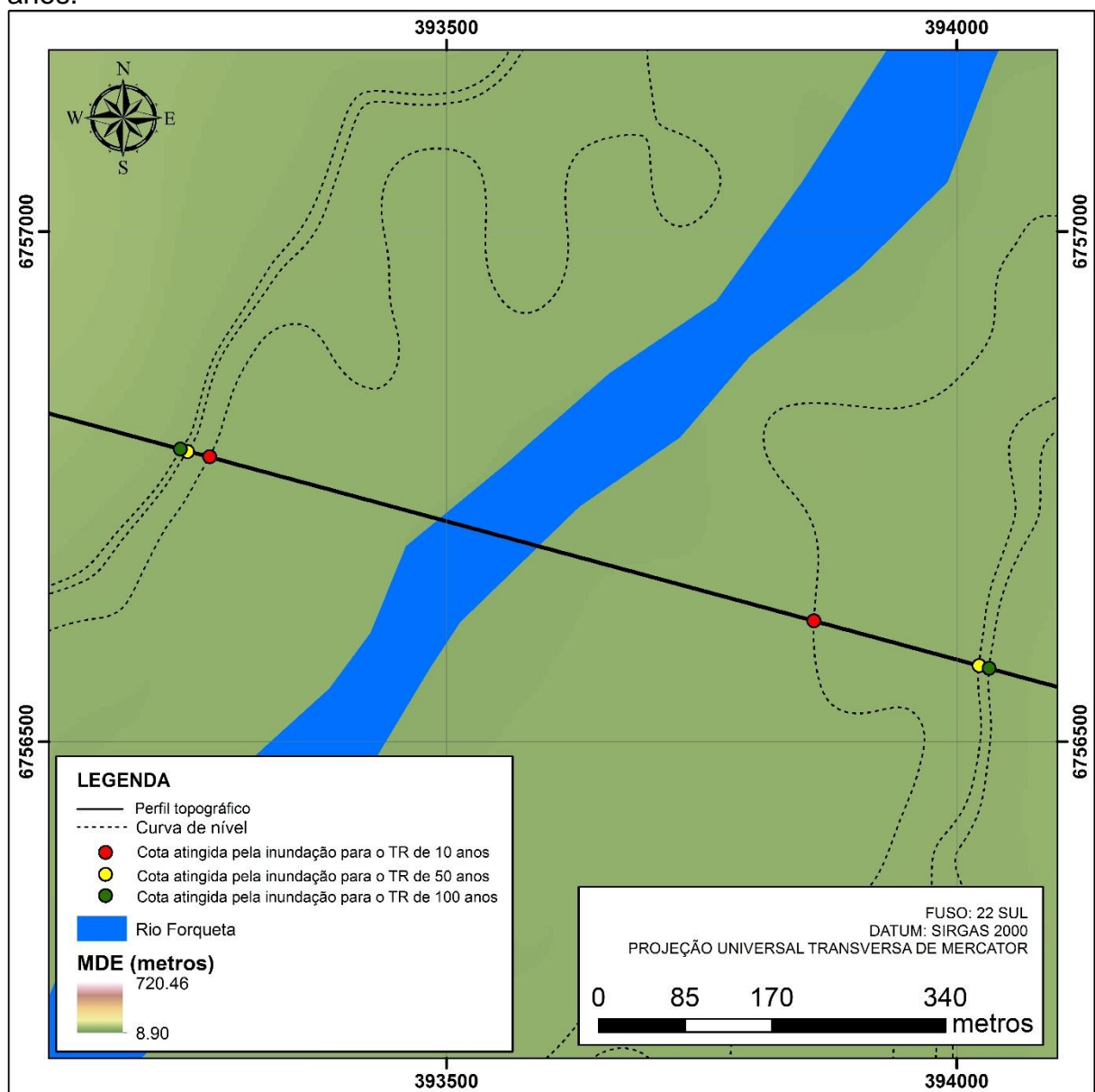
$$COTA = 0,049582 + 53,8253$$

Fonte: Autor (2015).

Com as cotas calculadas para cada perfil topográfico (Figura 21), gerou-se as curvas de nível com a ferramenta *Contour list*, utilizando como arquivo de entrada o MDE da área do município. Percebe-se que para cada perfil gerado, obtêm-se os valores das cotas atingidas pelas cheias, simuladas para os três cenários (TRs de 10, 50 e 100 anos). A Figura 22 apresenta um exemplo da elaboração das curvas de nível em um dos perfis da planície de inundação da bacia hidrográfica do rio Forqueta, demonstrando os limites para a espacialização das manchas atingidas pelas águas, demarcadas pelos pontos vermelhos (TR de 10 anos), amarelos (TR de 50 anos) e verdes (TR de 100 anos).

Após, desenhou-se manualmente as áreas inundáveis para os três cenários simulados (TRs de 10, 50 e 100 anos), no *software* ArcGIS 10.2, através de ferramentas de edição vetorial (Figura 23). Assim, definiu-se as áreas inundáveis com TR acima de 100 anos como áreas não suscetíveis, de 50 a 100 anos de baixa suscetibilidade, de 10 a 50 anos de média suscetibilidade e de até 10 anos de alta suscetibilidade a enxurradas e inundações.

Figura 22: Exemplo da elaboração das curvas de nível para a planície de inundação do rio Forqueta, com o limite da cota de inundação para os TRs de 10, 50 e 100 anos.

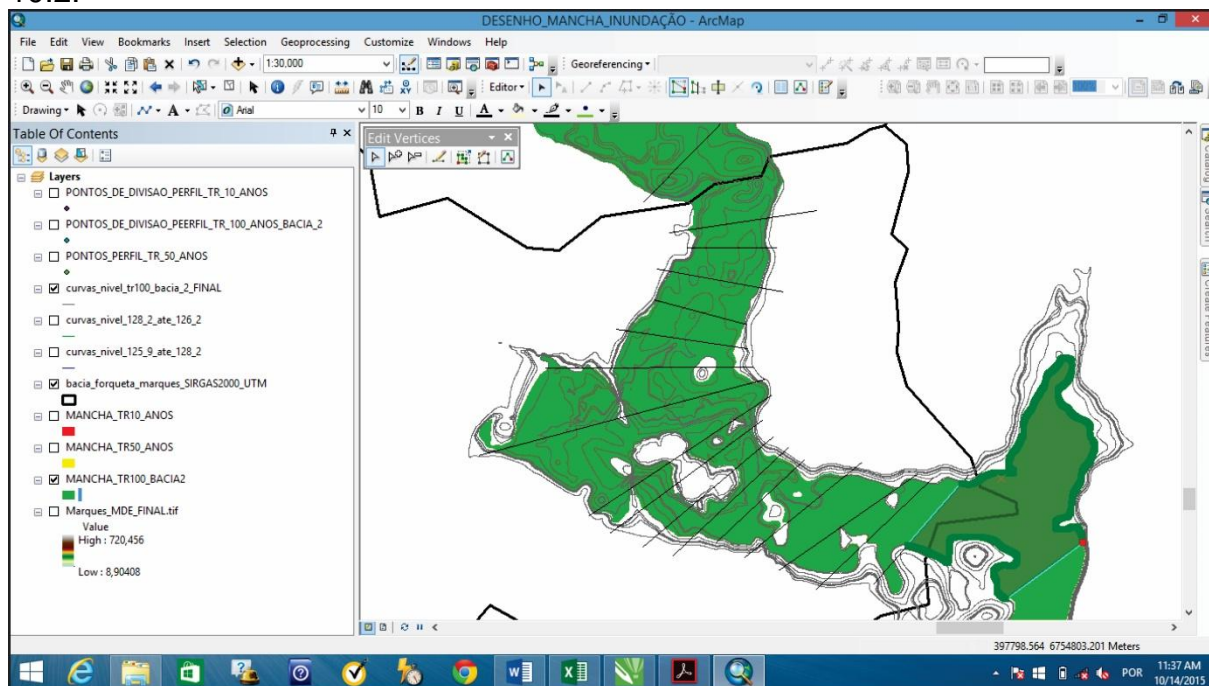


Fonte: Autor (2015).

Para a validação e verificação do mapeamento das áreas suscetíveis a enxurradas e inundações, utilizou-se as coordenadas geográficas do trabalho de

Porcher (2012), onde o autor realizou a vetorização da mancha de inundação através de 12 coordenadas geográficas conhecidas da enxurrada de 04 de janeiro de 2010.

Figura 23: Vetorização da mancha de inundação do TR 100 anos no *software* ArcGis 10.2.



Fonte: Autor (2015).

### 3.3.3 Geração de um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa

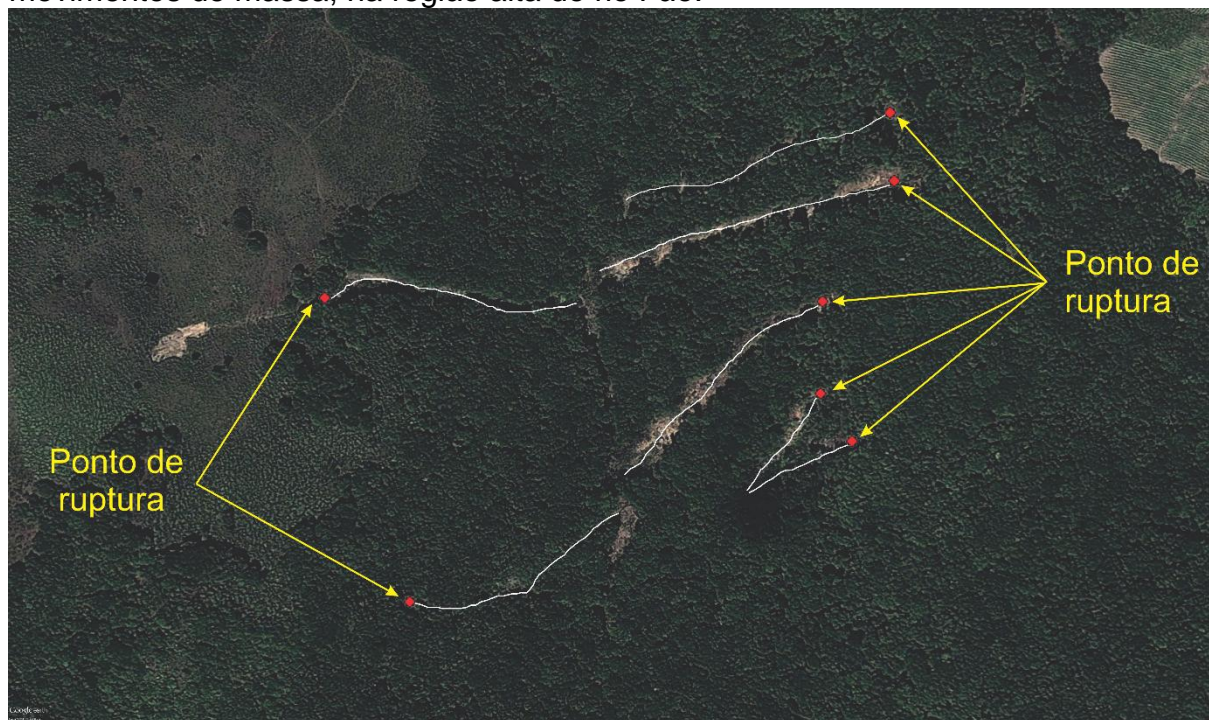
Para a realização do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa, realizou-se um inventário, identificando os locais onde ocorreram esses eventos. Em conversa realizada com o responsável pela defesa civil de Marques de Souza, senhor Ailton Lamm, não se têm muitos registros de movimentos de massa ocorridos no município. Dessa forma, a área de estudo abrangeu as bacias hidrográficas do rio Taquari-Antas, Caí e Sinos, identificando locais de ocorrência de movimentos de massa.

Os locais de ocorrência desses eventos foram identificados através de mídias online de jornais de grande circulação regional, e de trabalhos já realizados no Rio Grande do Sul, como os desenvolvidos por Martins (2013) e Oliveira (2015),



podendo ser identificadas as cicatrizes através de análise visual no *software* Google Earth Pro, conforme demonstrado na Figura 24.

Figura 24: Imagem Google Earth Pro de 17/01/2012, com os pontos de ruptura dos movimentos de massa, na região alta do rio Fão.



Fonte: Adaptado de Google Earth Pro (2015).

Com os locais identificados, realizou-se um levantamento físico da área, através de dados cartográficos digitais e de técnicas de geoprocessamento. Caracterizou-se o uso da terra, solos, geologia, geomorfologia, desnível do morro, desnível da rampa, orientação do relevo, forma do terreno, declividade, distância das falhas geológicas, distância do sistema viário e distância das linhas de contato litológico, do local de cada evento.

Para a obtenção das características físicas das bases vetoriais como uso da terra, solos, geologia e geomorfologia, utilizou-se a ferramenta *Spatial join* do ArcGis 10.2, gerando uma tabela com as características físicas para cada local de ocorrência dos movimentos de massa. Para as bases *raster*, como orientação, forma do terreno e declividade, utilizou-se a ferramenta *Extract value to points*, com a mesma finalidade da ferramenta anterior, gerando uma tabela com as características físicas de cada local de ocorrência dos movimentos de massa (Figura 25).

**A**

Spatial Join

Target Features  
Mapa\_de\_solos

Join Features  
Total\_de\_cicatrizes\_sirgas\_2000\_UTM

Output Feature Class  
C:\Users\Daniel\Documents\ArcGIS\Default.gdb\Mapa\_de\_solos\_Sp

Join Operation (optional)  
JOIN\_ONE\_TO\_ONE

☒ Keep All Target Features (optional)

Field Map of Join Features (optional)

- + CLASSE\_RAD (Text)
- + COD\_RADAM (Text)
- + SOLO\_EMBRA (Text)
- + COD\_EMBRA (Text)
- + RESISTENCI (Text)
- + MAT\_ORIGEM (Text)
- + EROSAO (Text)

OK Cancel Environments... Show Help >>

O	Join Count	CLASSE_RAD
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Podzóico Vermelho-Escuro alíco
6	0	Planossolo eutrófico
6	0	Planossolo eutrófico
6	0	Solos Lúlicos eutróficos
6	0	Solos Lúlicos eutróficos
6	0	Solos Lúlicos eutróficos
6	0	Solos Lúlicos eutróficos
6	0	Solos Lúlicos eutróficos
6	140	Solos Lúlicos eutróficos
6	0	Terra Bruna Estruturada intermediária para Podzóico Bruno-Acin
6	0	Terra Bruna Estruturada intermediária para Podzóico Bruno-Acin
6	0	Terra Bruna Estruturada intermediária para Podzóico Bruno-Acin
6	0	Terra Bruna Estruturada intermediária para Podzóico Vermelho-E
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Solos Alvíssos eutróficos
6	0	Brunizem Avermelhado

Mapa\_de\_solos\_SpatialJoin2

H < 1 > H [Symbol] (0 out of 1223 Selected)

Mapa\_de\_solos\_SpatialJoin2

**B**

Extract Values to Points

Input point features  
Total\_de\_cicatrizes\_sirgas\_2000\_UTM

Input raster  
DECLIVIDADE\_MOSAICO.tif

Output point features  
C:\Users\Daniel\Documents\ArcGIS\Default.gdb\Extract\_shp1

☐ Interpolate values at the point locations (optional)

☐ Append all the input raster attributes to the output point features (optional)

OK Cancel Environments... Show Help >>

Extract\_shp2

OBJECTID *	RASTERVALU
1	56
2	23
3	16
4	34
5	41
6	29
7	42
8	30
9	25
10	13
11	22
12	4
13	25
14	2

Para elaborar as bases de desnível do morro e desnível da rampa são necessários alguns processos no ArcGis (Figura 26):

- 67

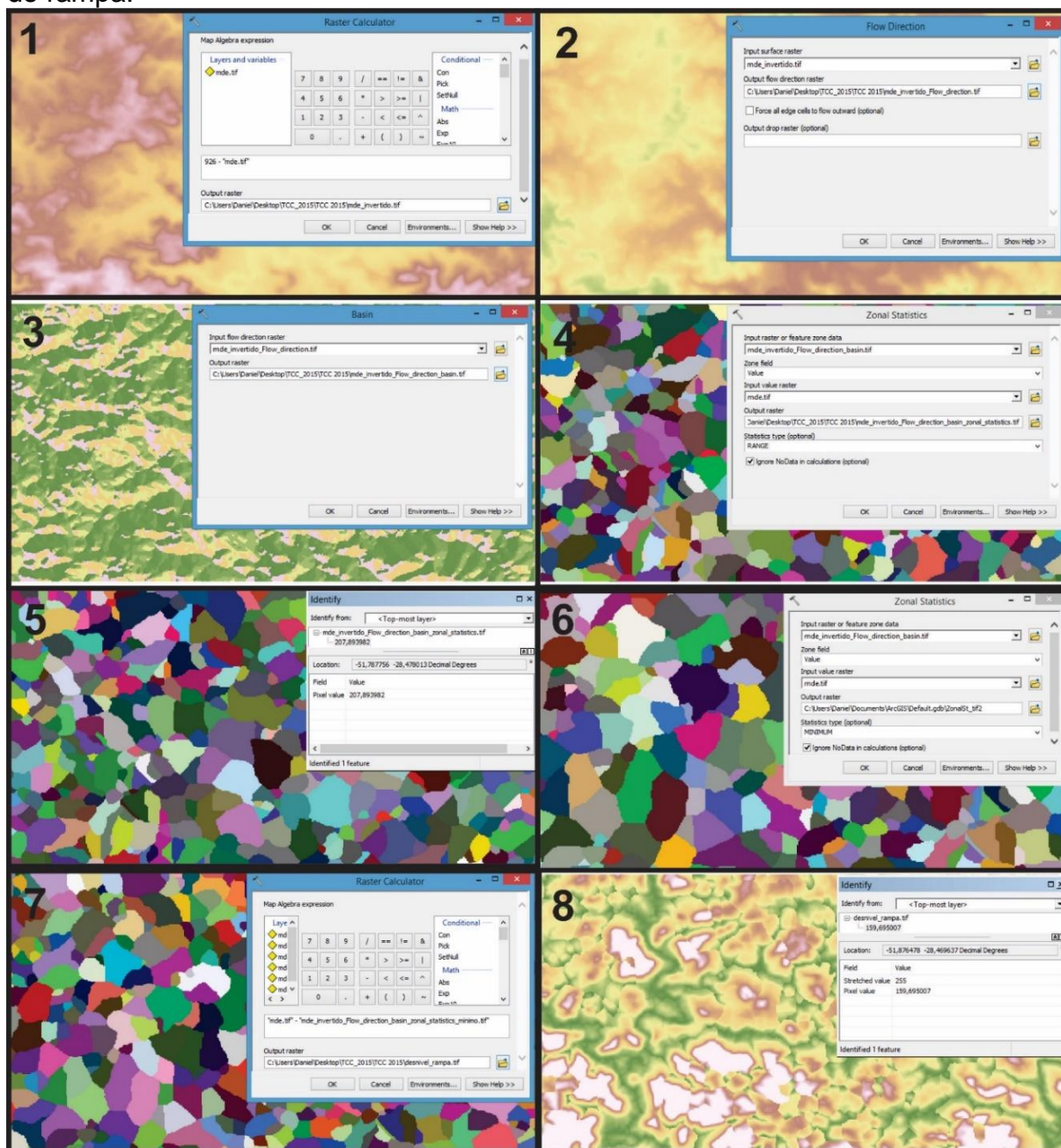
- 2) Utiliza-se a ferramenta *Flow Direction*, gerando um raster que contém a direção do fluxo de cada célula.
- 3) Para extrair os morros, utiliza-se a ferramenta *Basin*.
- 4) Com a ferramenta *Zonal Statistics*, inserindo como entrada o arquivo gerado com a ferramenta *Basin* e o MDE original, deve-se escolher o tipo de estatística, que para a elaboração do desnível de morro deve-se utilizar a opção *Range*.
- 5) Resultado adquirido com o processo desnível de morro, onde os valores de altimetria do morro serão os mesmos para qualquer parte dele, sempre considerando a maior altitude.
- 6) Para gerar o desnível de rampa os processos iniciais são os mesmos relatados anteriormente, o que se difere, é que na ferramenta *Zonal Statistics*, deve-se escolher como tipo de estatística o *Minimum*.
- 7) Deve-se realizar um processo a mais, novamente no *Raster Calculator*, subtraindo do MDE original o MDE mínimo, gerado anteriormente.
- 8) Resultado obtido com o processo de desnível de rampa.

Depois com a ferramenta *Extract value to points*, obtém-se os desníveis de rampa e de morro para cada movimento de massa.

Para elaborar as bases de distância das falhas geológicas, distância do sistema viário e distância das linhas de contato litológico, deve-se utilizar a ferramenta *Euclidean distance*, gerando assim um *raster* com as distâncias para cada base (Figura 27), após com a ferramenta *Extract value to points*, obtém-se uma tabela com as distâncias para cada movimento de massa.



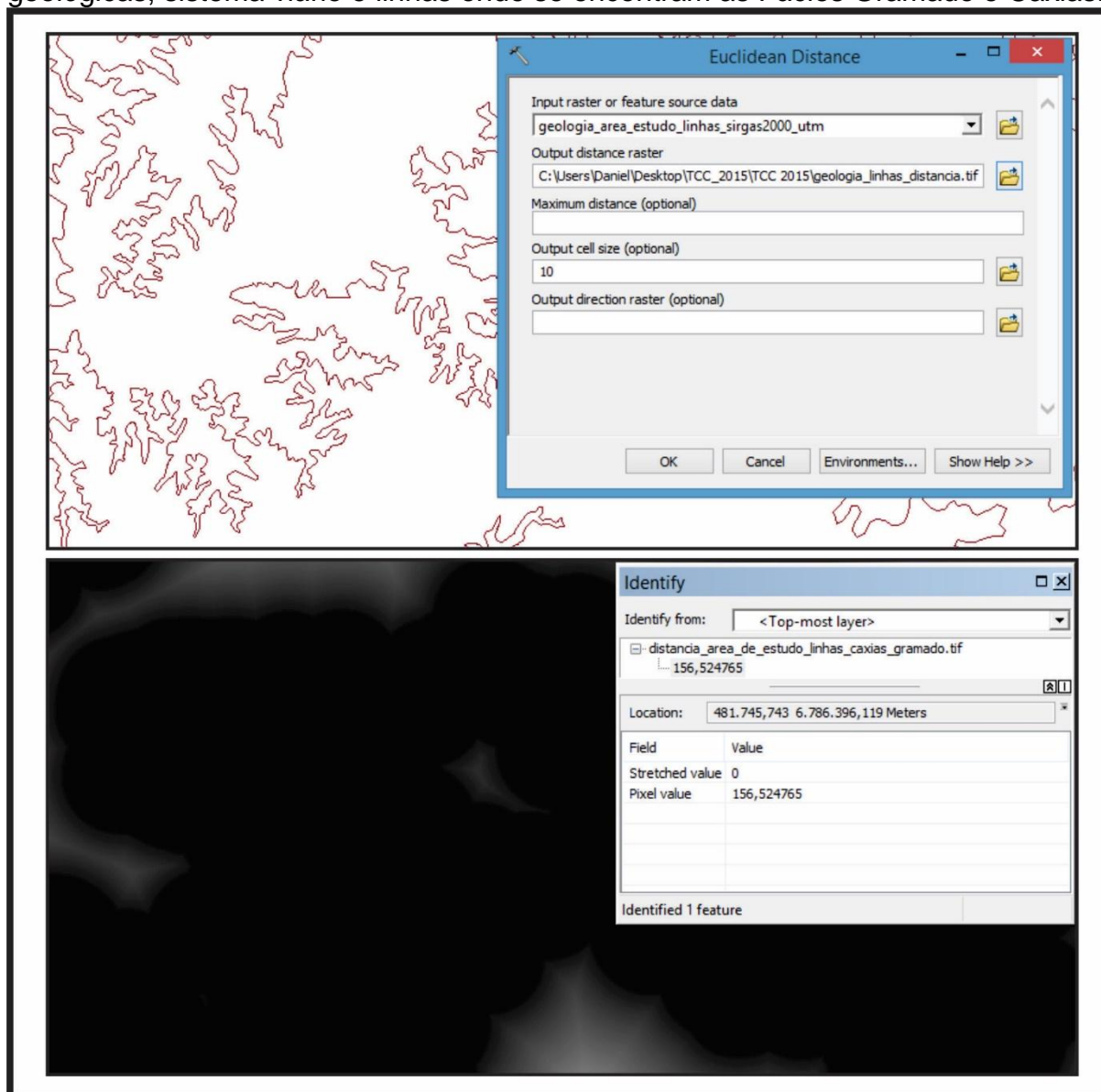
Figura 26: Processos realizados no ArcGis para obter o desnível do morro e desnível de rampa.



Fonte: Autor (2015).

Com os valores de cada uma das bases analisadas extraídos para os pontos referentes às cicatrizes de movimentos de massa, organizou-se os dados em uma planilha do Excel. Em seguida, foi realizada uma análise de frequência das ocorrências em relação a diferentes intervalos para cada um dos parâmetros listados, analisando quais bases poderiam explicar melhor a ocorrência dos movimentos de massa.

Figura 27: Processos realizados no ArcGis para obter as distâncias para falhas geológicas, sistema viário e linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias.



Fonte: Autor (2015).

Após, determinou-se os pesos das classes em cada uma das bases. Para suavizar as frequências em algumas bases digitais que apresentaram comportamento bimodal foi adotado um filtro de média móvel.

Posteriormente, verificou-se o percentual de movimentos de massa que cada classe representava do valor total, com isso, determinou-se que o maior peso (10,00) seria para a classe com o maior percentual, e os outros pesos foram calculados proporcionalmente, conforme podemos verificar na Figura 28.



Figura 28: Processo realizado no Excel para calcular os pesos de cada classe.

DESNÍVEL DA RAMPA					
CLASSES	Nº DE MOVIMENTOS	FILTRO		%	PESOS
0-50	32,00	32,00	32,00	15,21	7,56
50-100	35,00	36,33	36,33	17,27	8,58
100-150	42,00	42,33	42,33	20,13	10,00
150-200	50,00	37,67	37,67	17,91	8,90
200-250	21,00	26,67	26,67	12,68	6,30
250-300	9,00	11,33	11,33	5,39	2,68
300-350	4,00	5,67	6,00	2,85	1,42
350-400	4,00	5,33	6,00	2,85	1,42
400-450	8,00	6,00	6,00	2,85	1,42
450-500	6,00	6,00	6,00	2,85	1,42
TOTAL	211	209,33	210,3	100	

$$\% = \frac{N^{\circ} \text{ dos movimentos}}{\text{Total dos movimentos}} \times 100$$
  

DESNÍVEL DA RAMPA					
CLASSES	Nº DE MOVIMENTOS	FILTRO		%	PESOS
0-50	B3 32	32,00	32,00	15,21	7,56
50-100	B4 35	=MÉDIA(B3:B5)		17,27	8,58
100-150	B5 42	42,33	42,33	20,13	10,00

$20,13 = 10,00$   
 $17,27 = x$   
 $20,13x = 17,27 \cdot 10,00$   
 $x = (17,27 \cdot 10,00) / 20,13$   
 $x = 8,58$

Fonte: Autor (2015).

Após a determinação dos pesos para cada uma das classes de cada base, realizou-se um reescalonamento, utilizando o *software* ArcGis 10.2, através da ferramenta *Reclassify*, determinando para as classes de cada base os pesos encontrados. Os pesos foram transformados em uma escala de 0 a 1000 para evitar o uso de números decimais, o que torna o processamento mais demorado.

Apesar da realização de uma análise das bases de uso da terra, solos, geologia, geomorfologia, desnível do morro, desnível da rampa, orientação do relevo, forma do terreno, declividade, distância das falhas geológicas, distância do sistema viário e distância das linhas de contato litológico, optou-se por utilizar apenas quatro bases digitais (Figura 29), através de uma análise de frequência, escolhendo aquelas que parecem estar mais relacionadas aos movimentos de massa e que apresentam maior independência.

Para a elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa, por meio da álgebra de mapas, necessita-se também determinar um peso para cada uma das bases utilizadas, para verificar quais delas possuem maior importância. Dessa forma, utilizou-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*), conhecido como um método de análise multicritérios. Este método foi desenvolvido por Tomas L. Saaty no final da década de 1970.

Segundo Moraes, Ribeiro e Larentis (2012), este método tem a finalidade de auxiliar na tomada de decisões complexas. Mais do que definir qual a decisão certa

a ser tomada, o método AHP ajuda as pessoas a escolher e justificar suas escolhas. Possui como base a representação de um problema complexo através de uma estrutura hierárquica, com o objetivo de priorizar os fatores na análise das diversas alternativas.

Ainda conforme Moraes, Ribeiro e Larentis (2012), para a realização do método AHP primeiramente é necessário a definição do objetivo global e decomposição do sistema em vários níveis de hierarquia. Posteriormente, realiza-se a comparação pareada, onde deve-se gerar uma matriz e realizar o julgamento comparativo sempre entre duas bases, determinando qual tem maior importância em uma escala de 1 – 9, conforme apresentado no Quadro 8. Após, deve-se montar uma matriz quadrada de comparação, conforme apresentado na Figura 29.

O próximo passo consiste na normalização da matriz, processo este realizado para cada coluna da matriz. Para isso realiza-se a soma dos pesos de cada coluna da matriz, e divide o peso de cada base dessa coluna pela soma realizada anteriormente, a soma dos novos valores deve ser igual a 1. Em seguida, faz-se a média aritmética dos valores das linhas, representando o peso relativo da base da correspondente linha (CARVALHO, 2011).

Em seguida deve-se verificar a consistência da Matriz de Prioridades dos Critérios, multiplicando-se o valor presente em cada célula pelo valor do peso da mesma, obtendo assim a Matriz de Consistência. Após soma-se os valores de cada linha e divide os mesmos pelo peso de cada base correspondente a cada linha. Posteriormente realiza-se a média desses resultados, encontrando então o autovalor máximo da matriz ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) (SILVA, 2007).

Após, deve-se calcular o IC (Índice de Consistência), conforme apresentado pela equação 11. Segundo Silva (2007), para que a matriz tenha consistência o valor encontrado deve ser menor que 0,1, caso o valor fica maior, deve-se realizar novamente os julgamentos, até que a consistência aumente.

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (11)$$

Onde: IC é o Índice de Consistência;  $\lambda_{\text{máx}}$  é o autovalor máximo da matriz; n é o número de linhas e colunas.

Silva (2007) relata que Saaty (1991) sugere o uso da Razão de Consistência realizada através da equação 12. Para este cálculo, deve-se considerar o IC e o Índice Randômico (IR), que varia com o tamanho n da amostra. Saaty (1991) propõe uma tabela com os índices randômicos (IR) de matrizes de ordem 1 a 15 calculados em laboratório, conforme exibido na Figura 30.

$$\text{Razão de Consistência} = \frac{IC}{\text{Índice Randômico (IR) para } n} \quad (12)$$

Onde: IC é o Índice de Consistência; IR é o Índice Randômico; n é o número de linhas e colunas.

Figura 29: Matriz de preenchimento do método AHP para calcular os pesos de cada base utilizada no mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

	DECLIVIDADE	DESNÍVEL DE RAMPA	DISTÂNCIA DAS LINHAS DE CONTATO LITOLÓGICO	GEOMORFOLOGIA
DECLIVIDADE	1	5	5	7
DESNÍVEL DE RAMPA	1/5	1	1	3
DISTÂNCIA DAS LINHAS DE CONTATO LITOLÓGICO	1/5	1	1	2
GEOMORFOLOGIA	1/7	1/3	1/2	1

Fonte: Autor (2015).

Figura 30: Índice Randômico Médio do AHP.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty (1991).

A escala recomendada por Silva (2007), apresentada no Quadro 8, vai de 1 a 9, com 1 significando a indiferença de importância de um critério em relação ao outro, e 9 significando a extrema importância de um critério sobre outro, com estágios intermediários de importância entre esses níveis 1 e 9. Além disso, desconsiderando as comparações entre os próprios critérios, que representam 1 na escala.

Quadro 8: Comparações do método AHP.

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Fonte: Saaty (1991).

Finalizados os processos anteriores, deve-se realizar um cruzamento entre os mapas, através da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGis 10.2, sempre multiplicando cada uma das bases com o seu peso encontrado através do método AHP e somando com a próxima base, gerando então um único mapa. Dessa forma, gerando um mapa final com escala entre 0 – 10, sendo necessário determinar em quais os períodos encontram-se as áreas de baixa, média, alta e sem suscetibilidade aos movimentos de massa.

Para a determinação das áreas de baixa, média, alta e sem suscetibilidade aos movimentos de massa, selecionou-se a região com o maior número de

ocorrências de movimentos de massa, localizada na bacia hidrográfica do rio Forqueta, na região do alto rio Fão. Foram elaboradas as mesmas bases e os mesmos processos desenvolvidos para a área do município de Marques de Souza. Após, verificou-se em qual peso iniciavam-se os movimentos de massa nessa região. Dessa forma, determinou-se que o valor dos pesos que não tinham ocorrência de movimentos de massa como áreas sem suscetibilidade, porém quando se realizou esse processo no município de Marques de Souza, verificou-se que toda a área ficava com algum grau de suscetibilidade.

Por este motivo, optou-se por realizar uma omissão de 15% nos movimentos de massa, determinando assim, esses locais como área sem suscetibilidade. Os restantes dos movimentos foram divididos de baixa, média e alta suscetibilidade, de uma forma que ocorresse uma boa distribuição entre as três classes de suscetibilidade, com isso, os valores escolhidos foram de 15 – 30% baixa suscetibilidade, 30 – 80% média suscetibilidade e maior que 80% e alta suscetibilidade.

#### **3.3.4 Elaboração do zoneamento de aptidão do uso do solo para habitação**

Para a elaboração do zoneamento das áreas com aptidão do uso do solo para habitação, realizou-se um cruzamento dos mapas de suscetibilidade a enxurradas e inundações, e o de suscetibilidade a movimentos de massa, elaborando assim uma última base digital, definida como mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações.

O mapa foi classificado em seis zonas de aptidão para habitação. Os locais onde ocorreram algumas sobreposições de áreas com diferentes classes de suscetibilidade, como por exemplo, uma de baixa suscetibilidade a enxurradas e inundações e uma de média suscetibilidade a movimentos de massa, definiu-se como média suscetibilidade, seguindo o princípio da precaução. Optou-se por não unificar as áreas de mesmo nível de suscetibilidade a enxurradas e inundações e movimentos de massa, por serem eventos de diferentes características, dessa

forma, são necessárias diferentes precauções estruturais no momento da construção desses imóveis.

As áreas que não apresentavam suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, foram definidas como Zona 1, com permissão para todos os tipos de uso, dando preferência para escolas, creches, hospitais, clínicas e empreendimentos do gênero, por haver uma grande concentração de pessoas, e muitas vezes pessoas mais vulneráveis, o ideal seria utilizar essa zona com a ocupação para esses tipos de empreendimentos.

As áreas de baixa suscetibilidade aos movimentos de massa foram definidas como Zona 2 e as áreas de baixa suscetibilidade a enxurradas e inundações como Zona 3. As áreas de média suscetibilidade aos movimentos de massa foram definidas como Zona 4 e as áreas de média suscetibilidade a enxurradas e inundações como Zona 5. Por fim, as áreas de alta suscetibilidade a enxurradas, inundações e movimentos de massa como Zona 6.

As Zonas 2 e 3, correspondentes às áreas de baixa suscetibilidade à enxurradas, inundações e movimentos de massa, onde poderia ser permitida a ocupação principalmente de moradias, sugerindo determinada exigência estrutural, de acordo com o tipo de perigo. Já nas Zonas 4 e 5, correspondentes às áreas de média suscetibilidade à enxurradas, inundações e movimentos de massa, serão sugeridas a ocupação principalmente de comércios, indústrias e parques, ou moradias com uma determinada exigência estrutural, sendo que as exigências estruturais serão diferentes entre a Zona 4 e 5, por se tratarem de eventos diferentes.

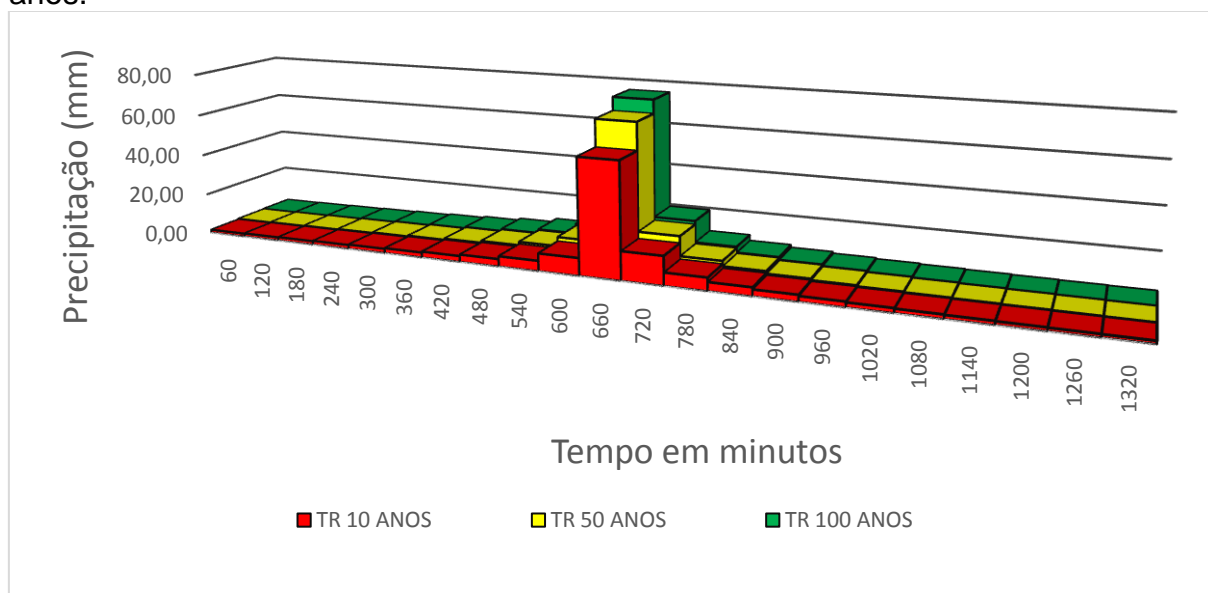
A Zona 6 corresponde às áreas de alta suscetibilidade à enxurradas, inundações e movimentos de massa, nesses locais a proposta é a restrição para habitação, segundo a Lei 12.608/12 da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC, “é vedada a concessão de licença ou alvará de construção em áreas de risco indicadas como não edificáveis”, podendo nessas áreas a realização de cultivos pecuários ou agrícolas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Mapa de suscetibilidade a enxurradas e inundações

Conforme a metodologia descrita, foram gerados três hietogramas de projeto para precipitações extremas com recorrência de 10, 50 e 100 anos, considerando uma duração de 22 horas (tempo de concentração da bacia). A Figura 31 apresenta um gráfico com os três hietogramas sobrepostos.

Figura 31: Hietogramas de projeto para a bacia do rio Forqueta, TRs de 10, 50 e 100 anos.



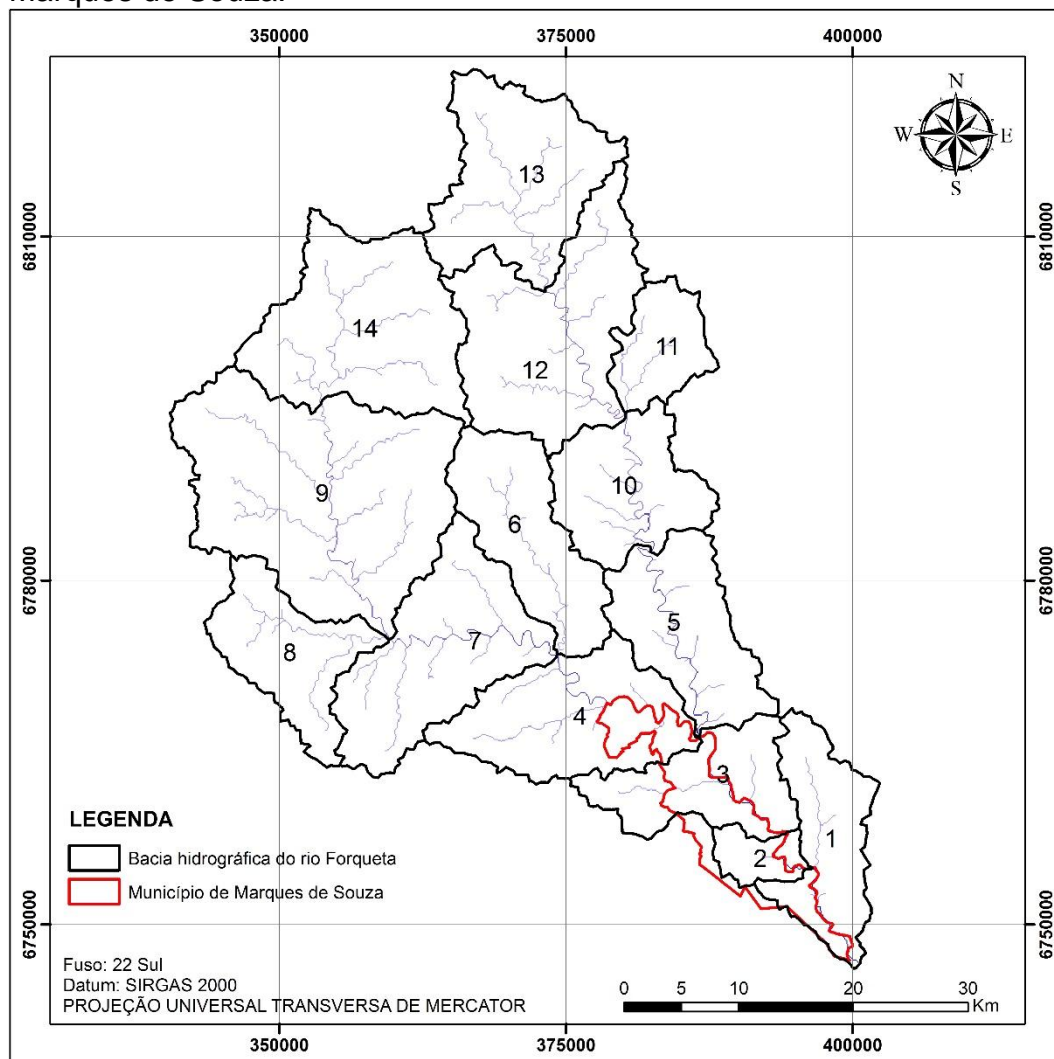
Fonte: Autor (2015).

No primeiro evento simulado, referente às cheias que ocorrem com maior frequência (a cada 10 anos), a lâmina total precipitada foi de 128,80 mm, em um

tempo de chuva de vinte e duas horas, para o TR de 50 anos a lâmina total de água precipitada foi de 157,09 mm e para o TR de 100 anos foi de 172,27 mm, calculado através da equação 8.

No *software* IPHS1, conforme descrito no capítulo de métodos, os valores dos parâmetros para os métodos SCS e Muskingum-Cunge foram adquiridos do trabalho de Da Cas (2015). Com a simulação hidrológica encontrou-se os valores das vazões e das cotas máximas para cada um dos eventos simulados (TR 10, 50 e 100 anos), para as quatro sub-bacias (Figura 32) que compreendem a área do município de Marques de Souza.

Figura 32: Bacia hidrográfica do rio Forqueta delimitada a partir do município de Marques de Souza.



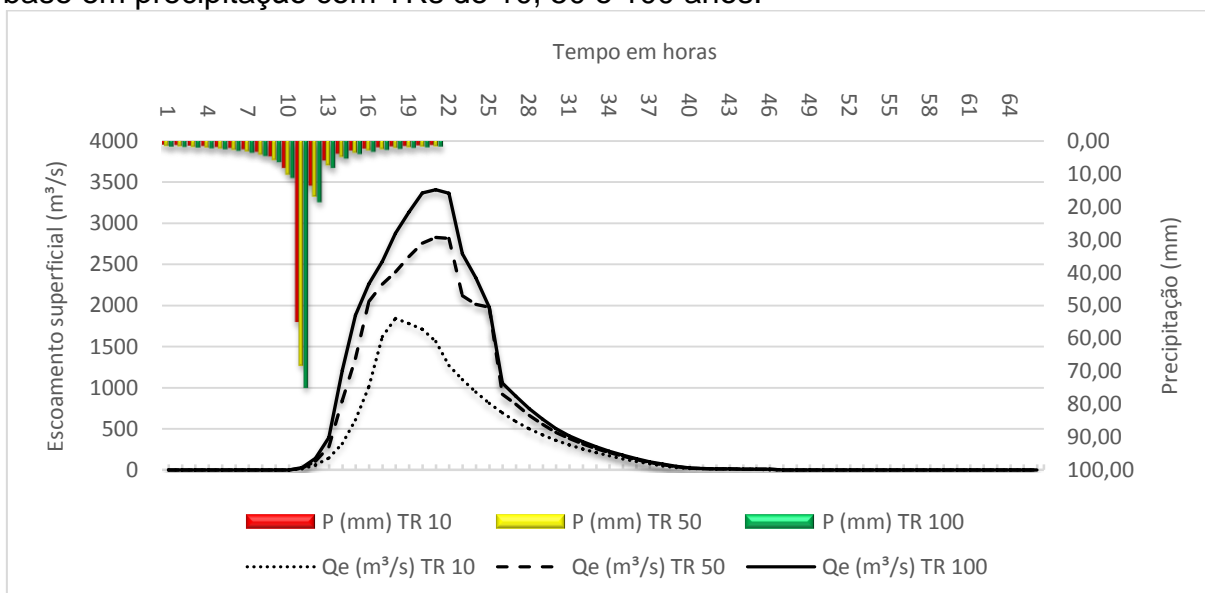
Fonte: Adaptado Da Cas (2015).

Os valores do escoamento superficial para os três TRs (10, 50 e 100 anos) podem ser observados no hidrograma de saída gerado em cada uma das quatro



sub-bacias. A Figura 33 está demonstrando os valores do escoamento superficial da sub-bacia 4, localizada ao norte do município de Marques de Souza, pode-se verificar que o escoamento superficial máximo da sub-bacia para o TR de 10 anos é de 1.844,93 m<sup>3</sup>/s, TR de 50 anos é de 2.829,47 m<sup>3</sup>/s e o TR de 100 anos 3.409,11 m<sup>3</sup>/s. Também apresenta as precipitações projetadas para os três cenários, pode-se verificar que o escoamento superficial se inicia após 11 horas do início da precipitação, atingindo o pico do escoamento superficial para o TR de 10 anos 18 horas após o início da chuva, e para os TRs de 50 e 100 anos ocorre após 21 horas do início da precipitação.

Figura 33: Hidrogramas da sub-bacia 4, na porção norte de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.

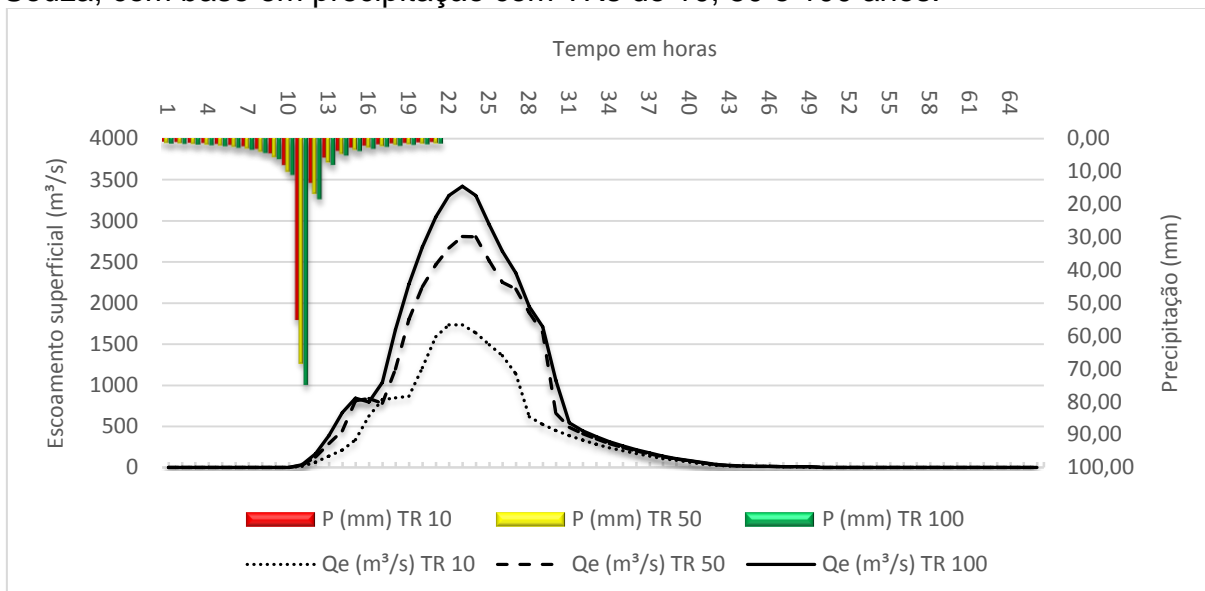


Fonte: Autor (2015).

A Figura 34 está demonstrando os valores do escoamento superficial da sub-bacia 3, localizada na parte centro-norte do município de Marques de Souza, pode-se verificar que o escoamento superficial máximo da sub-bacia para o TR de 10 anos é de 1.734,60 m<sup>3</sup>/s, TR de 50 anos é de 2.807,05 m<sup>3</sup>/s e o TR de 100 anos 3.421,53 m<sup>3</sup>/s. Também apresenta as precipitações projetadas para os três cenários, verifica-se que o escoamento superficial inicia-se após 11 horas do início da chuva. Comparando o escoamento superficial com as precipitações para os três cenários, verifica-se que o pico do escoamento superficial ocorre após o término da chuva.

Para os TRs de 10, 50 e 100 anos o pico do escoamento superficial ocorre no mesmo horário, após 23 horas do início da precipitação.

Figura 34: Hidrogramas da sub-bacia 3, na porção centro-norte de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.



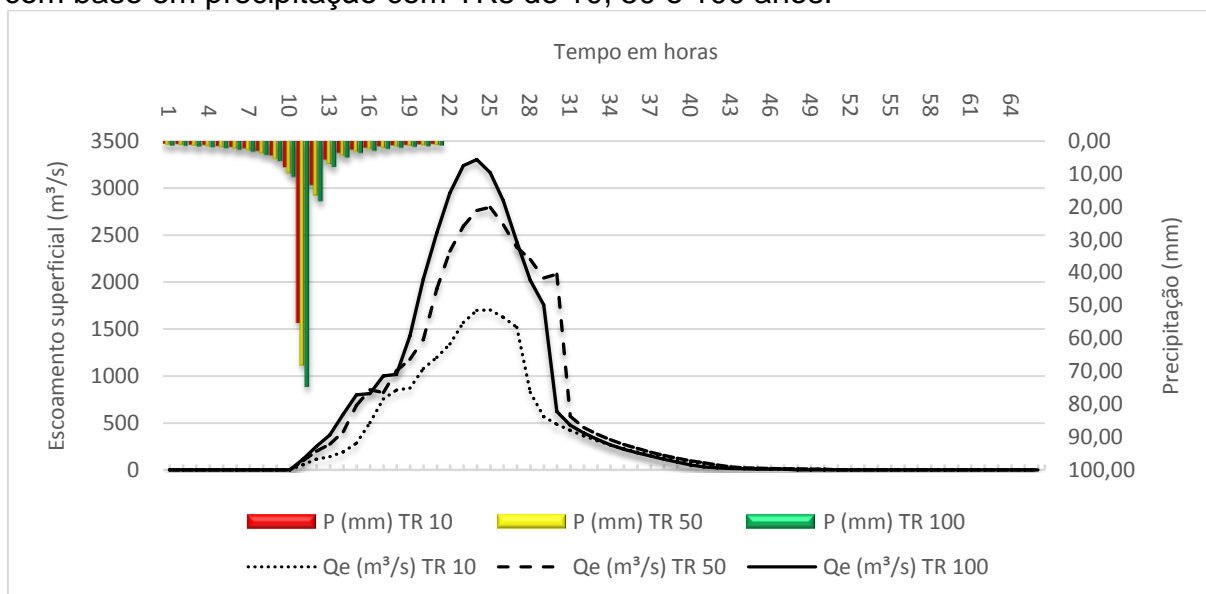
Fonte: Autor (2015).

A Figura 35 está demonstrando os valores do escoamento superficial da sub-bacia 2, localizada na parte centro-sul do município de Marques de Souza, pode-se verificar que o escoamento superficial máximo da sub-bacia para o TR de 10 anos é de 1.702,28 m³/s, TR de 50 anos 2.795,37 m³/s e o TR de 100 anos 3.300,99 m³/s. Também apresenta as precipitações projetadas para os três cenários, verifica-se que o escoamento superficial inicia-se após 11 horas do início da chuva. Comparando as vazões com as precipitações para os três cenários, verifica-se que o pico do escoamento superficial ocorre após o término da chuva. Para os TRs de 10 e 50 anos o pico do escoamento superficial ocorre 25 horas após o início da precipitação, e para o TR de 100 anos 24 horas após o início da precipitação.

A Figura 36 está demonstrando os valores do escoamento superficial da sub-bacia 1, localizada na parte sul do município de Marques de Souza, pode-se verificar que o escoamento superficial máximo da sub-bacia para o TR de 10 anos é de 1.986,32 m³/s, TR de 50 anos 2.711,43 m³/s e o TR de 100 anos 3.283,89 m³/s. Também apresenta as precipitações projetadas para os três cenários, verifica-se que o escoamento superficial inicia-se após dez horas do início da chuva.

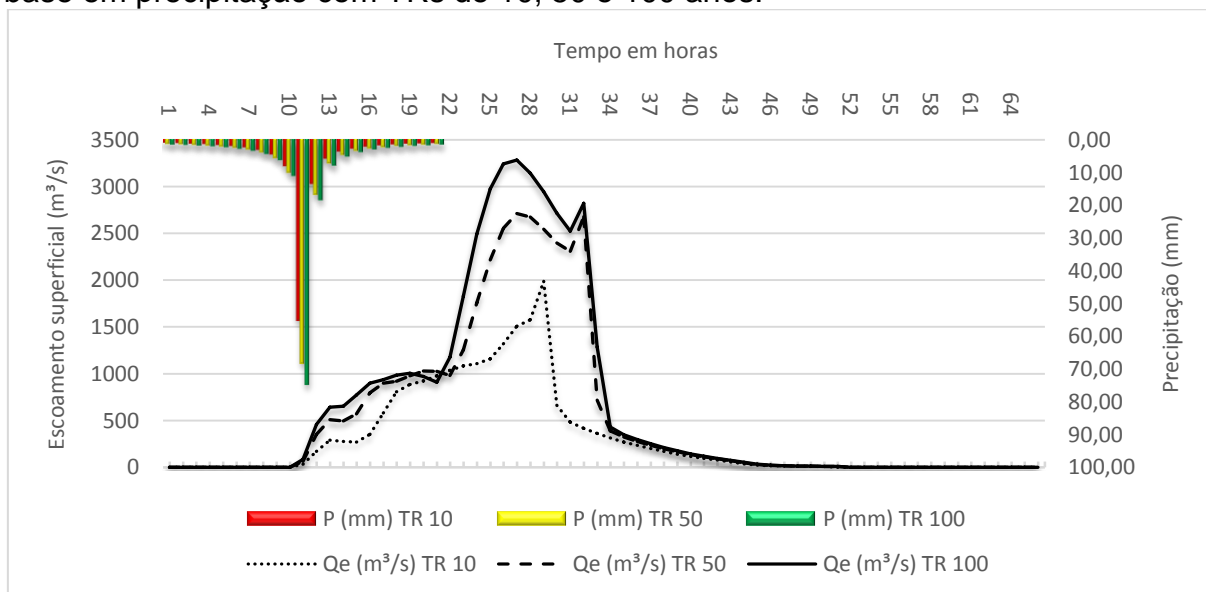
Comparando as vazões com as precipitações para os três cenários, verifica-se que o pico do escoamento superficial ocorre após o término da chuva. Para os TRs de 10 o pico do escoamento superficial ocorre 29 horas após o início da precipitação, e para os TRs de 50 e 100 anos 27 horas após o início da precipitação.

Figura 35: Hidrogramas da sub-bacia 2, na porção centro-sul de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.



Fonte: Autor (2015).

Figura 36: Hidrogramas da sub-bacia 1, na porção sul de Marques de Souza, com base em precipitação com TRs de 10, 50 e 100 anos.



Fonte: Autor (2015).

No Quadro 9, pode-se verificar os valores das cotas máximas calculadas para os trechos de rio das quatro sub-bacias, considerando o canal simplificado utilizado na modelagem hidrológica, na qual o canal é representado na forma de um retângulo, com altura e largura média do canal e altura e largura média da planície de inundação para o trecho, correspondente aos três cenários (TR 10, 50 e 100 anos).

Quadro 9: Cotas (metros) calculadas no IPHS1 para cada trecho de rio das quatro sub-bacias, para os TRs de 10, 50 e 100 anos.

BACIAS	TRs		
	10	50	100
1	4,75	5,09	5,32
2	4,48	5,1	5,32
3	4,98	5,82	6,28
4	3,92	4,89	5,48

Fonte: Autor (2015).

Com os valores das cotas encontrados para cada trecho de rio, possibilitou-se calcular a área da seção transversal “molhada”, utilizando a equação 10 apresentada na metodologia. O resultado pode ser verificado no Quadro 10.

Quadro 10: Área (m<sup>2</sup>) da seção transversal "molhada", calculadas através dos dados do IPHS1 para cada trecho de rio das quatro sub-bacias, para os TRs de 10, 50 e 100 anos.

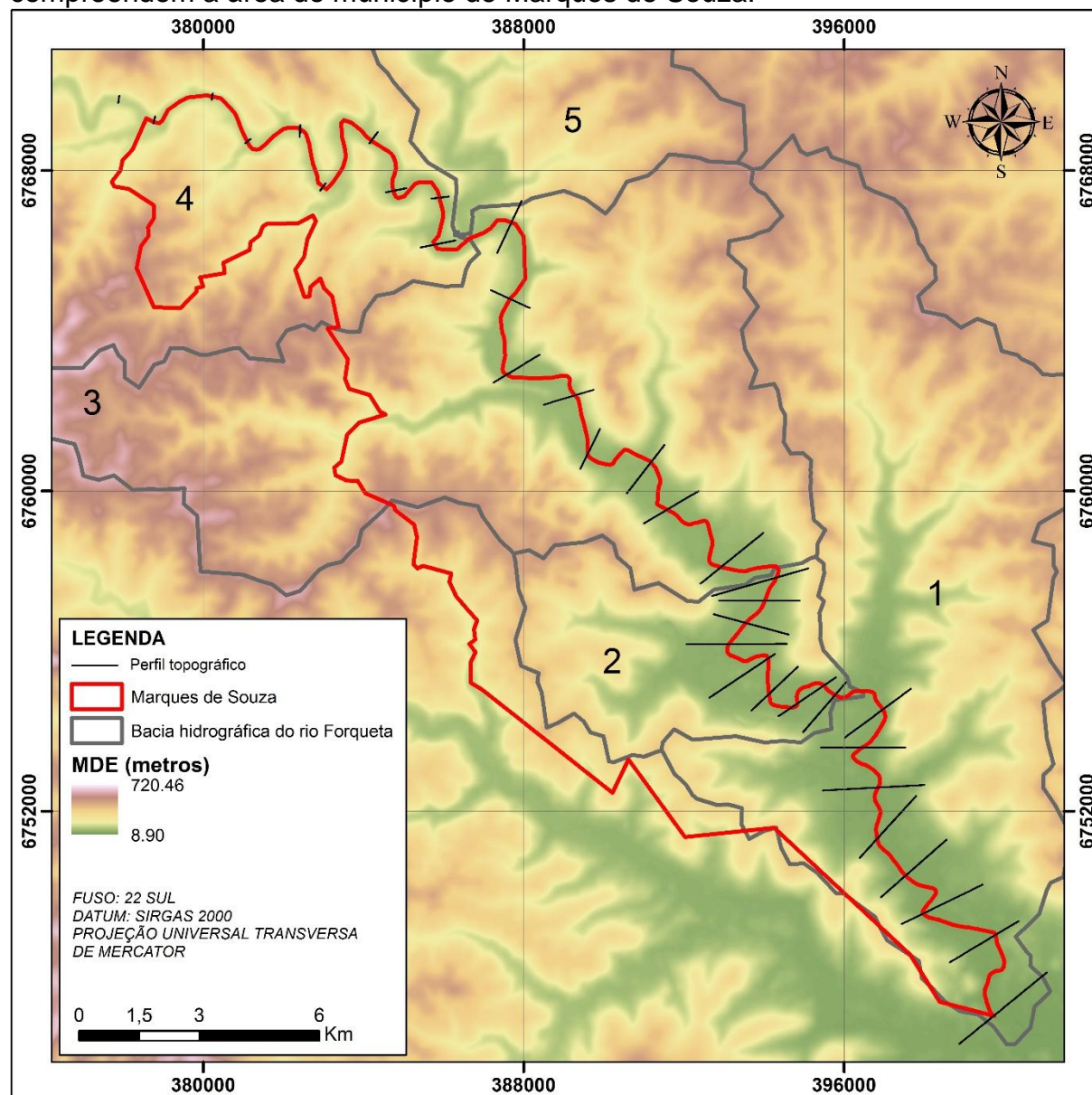
BACIAS	TRs		
	10	50	100
1	2064,00	2750,91	3215,59
2	1206,51	2117,68	2440,99
3	1328,30	2035,83	2423,28
4	304,68	463,78	560,55

Fonte: Autor (2015).

No *software* ArcGis 10.2, obteve-se o perfil topográfico para as quatro sub-bacias que compreendem a área do município de Marques de Souza. Para as sub-bacias 1, 2 e 3 foram gerados 8 perfis para cada uma delas, e para a sub-bacia 4 foram 10 perfis, conforme apresentado na Figura 37. Optou-se por gerar dois perfis a mais na sub-bacia 4, pois o desnível topográfico da sub-bacia era maior do que as outras três, dessa forma permitindo uma melhor precisão na vetorização da mancha de inundação.

Com isso, possibilitou-se calcular a área da seção transversal em cada um dos perfis. Após isso, conforme fórmulas demonstradas na metodologia, foi possível calcular a cota altimétrica atingida pelas águas em cada seção transversal (perfil topográfico) nos três cenários (TR 10, 50 e 100 anos), conforme verificado no Quadro 11.

Figura 37: Espacialização dos perfis topográficos gerados nas quatro sub-bacias que compreendem a área do município de Marques de Souza.



Fonte: Autor (2015).

Com as cotas calculadas para as sub-bacias (Quadro 11), gerou-se as curvas de nível, conforme apresentado na metodologia, utilizando como dado de entrada o MDE desenvolvido para a área de estudo. Dessa forma, realizando o mapeamento

das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações, considerando as cotas apresentadas no Quadro 11, com TRs de 10, 50 e 100 anos.

Quadro 11: Cota altimétrica (metros) atingidas pelas águas para as quatro sub-bacias, nos três cenários (TR 10, 50 e 100 anos).

PERFIS	TRs	SUB-BACIA 1	SUB-BACIA 2	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 4
1	10 ANOS	35,63	52,32	59,07	91,59
	50 ANOS	36,06	53,50	59,87	92,14
	100 ANOS	36,34	53,87	60,31	92,41
2	10 ANOS	37,48	53,00	62,93	91,36
	50 ANOS	38,65	53,93	64,18	92,36
	100 ANOS	39,30	54,21	64,79	92,91
3	10 ANOS	42,62	54,74	63,76	93,49
	50 ANOS	43,96	55,81	64,82	94,13
	100 ANOS	44,79	56,15	65,35	94,48
4	10 ANOS	43,50	59,09	68,27	106,98
	50 ANOS	44,38	60,30	69,75	108,49
	100 ANOS	44,95	60,67	70,45	109,30
5	10 ANOS	44,06	57,06	69,01	115,88
	50 ANOS	44,92	58,18	69,98	117,27
	100 ANOS	45,44	58,48	70,51	117,99
6	10 ANOS	43,94	58,54	72,47	114,32
	50 ANOS	44,62	59,77	73,68	116,00
	100 ANOS	45,02	60,17	74,30	116,90
7	10 ANOS	47,79	59,10	78,57	117,95
	50 ANOS	48,44	60,60	81,66	119,42
	100 ANOS	48,82	61,08	83,09	120,22
8	10 ANOS	48,16	61,62	84,22	125,92
	50 ANOS	49,04	62,77	87,21	127,70
	100 ANOS	49,63	63,16	88,50	128,72
9	10 ANOS	-	-	-	128,16
	50 ANOS	-	-	-	129,63
	100 ANOS	-	-	-	130,50
10	10 ANOS	-	-	-	126,17
	50 ANOS	-	-	-	127,77
	100 ANOS	-	-	-	128,65

Fonte: Autor (2015).

A Figura 38 apresenta as áreas suscetíveis às inundações do rio Forqueta, com recorrência entre 10 e 100 anos. As áreas atingidas somente em eventos com recorrência entre 50 e 100 anos foram definidas como de baixa suscetibilidade. As áreas de média suscetibilidade são aquelas atingidas pelas inundações com TR entre 10 e 50 anos. Já as áreas inundadas com recorrência inferior a 10 anos foram

definidas como de alta suscetibilidade, e as áreas que não são atingidas por nenhum dos TRs, considerou-se como área sem suscetibilidade.

A primeira consideração refere-se ao fato de haver pouca diferença entre as manchas de inundação referentes aos TRs de 10 e de 100 anos. Isso se deve às características morfométricas do vale do rio Forqueta, que apresenta vales bastante encaixados, o que faz com que uma precipitação com recorrência de 10 anos já provoque uma cheia com magnitude suficiente para que as águas atinjam os limites da planície de inundação. Assim, mesmo aumentando a vazão de pico em um cenário de chuva mais crítica (TR de 100 anos), a área inundada não se eleva consideravelmente.

Isso pode ser afirmando calculando as áreas das manchas de inundação. No TR de 10 anos a área atingida é de 1.177,53 hectares, representando aproximadamente 9,39% da área total do município e no TR de 50 anos a área atingida é de 1.323,70 hectares, ou seja, 10,55% da área total do município. Para um evento com precipitações mais extremas, como o TR de 100 anos a área atingida pelas águas é de 1.385,74 hectares, representando aproximadamente 11,05% da área total do município. Verifica-se que o aumento da área de inundação representa um percentual de 17,68% entre os TRs de 10 e 100 anos. Esse aumento é mais considerável entre os TRs de 10 e 50 anos, representando 12,41% e entre o TRs de 50 e 100 anos o aumento da área de inundação é bem menor, 4,69%.

Apesar de não haver uma grande variação na área inundada, entre os TRs de 10, 50 e 100 anos, o nível do rio Forqueta apresenta, em média, uma diferença de 0,53 metros entre os eventos com TRs entre 10 e 100 anos. A cota média da lâmina de água sobre o município de Marques de Souza em um evento com TR de 10 anos é de 0,68 metros, enquanto que em cenários mais extremos (TR 100 anos) é de 1,75 metros.

A Figura 39 apresenta a mancha de inundação da área urbana do município de Marques de Souza. A área urbana do município corresponde a apenas 2,41% da área total, ou seja, uma área de 302,28 hectares. Desses, 57,96% encontram-se em áreas com alguma suscetibilidade a enxurradas e inundações, representando uma área de 175,21 hectares. A área inundada para o TR de 10 anos é de 133,39

hectares, o TR de 50 anos é 165,56 hectares e o TR de 100 anos é 175,21 hectares. Verifica-se que o aumento da área inundada entre TRs de 10 e 50 anos é de 24,12% e de 50 e 100 anos é de 7,24%. O aumento maior entre os TRs para a área urbana ocorre, pois, a região onde ela está localizada, a planície de inundação é maior, assim, havendo uma maior área para a inundação.

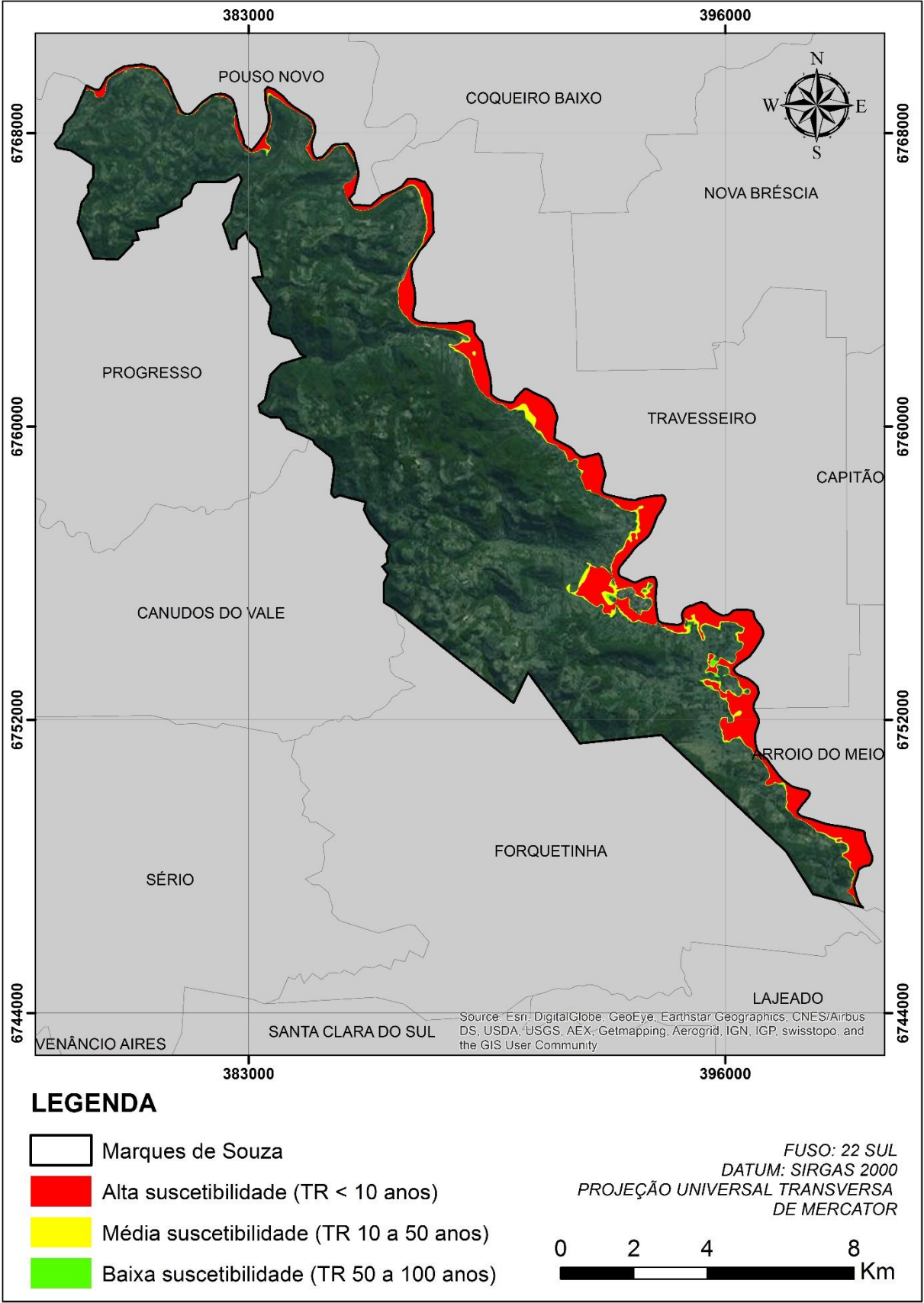
A Figura 40, apresenta a espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações do município de Marques de Souza, juntamente com as coordenadas geográficas utilizadas no trabalho de Porcher (2012) dos locais atingidos pelo evento ocorrido em 04 de janeiro de 2010. Percebe-se que os pontos estão próximos ou até mesmo dentro da mancha de inundação, indicando uma coerência no mapeamento delas, pois um fenômeno desses, de tamanha magnitude, com precipitações em alguns locais da bacia hidrográfica do rio Forqueta maiores que 200 mm, acredita-se que seu TR seja maior que 100 anos, pois a chuva de projeto calculada para a simulação hidrológica para o TR de 100 anos foi de 172,27 mm.

No mapa B, apresentado na Figura 40, foi realizado um zoom na área urbana do município, verifica-se que o ponto amostrado por Porcher (2012), fica fora da mancha do TR de 100 anos, indicando uma boa consistência dos resultados, pois conforme relatado anteriormente, acredita-se que o TR para este evento é maior que 100 anos.

A Figura 41, apresenta uma comparação entre as coordenadas geográficas de Porcher (2012) e as manchas de inundações do TR de 100 anos, em quatro regiões do município de Marques de Souza. Foi escolhido um ponto em cada uma das sub-bacias que compreendem a área do município, conforme apresentado nos mapas A (sub-bacia 4), B (sub-bacia 3), C (sub-bacia 2) e D (sub-bacia 1). Na sub-bacia 4, percebe-se que o ponto amostrado por Porcher (2012) fica dentro da mancha de inundação do TR de 10 anos, porém a distância para o limite da mancha de inundação do TR de 100 anos não é muito grande, representando aproximadamente 24,35 metros. Para as sub-bacias 1, 2 e 3, os pontos amostrados ficam fora da mancha de inundação do TR de 100 anos, a uma distância de aproximadamente 51,23 metros, 17,89 metros e 19,46 metros, respectivamente. Isso é esperado pois, acredita-se que o TR do evento ocorrido em 2010 seja maior que 100 anos.

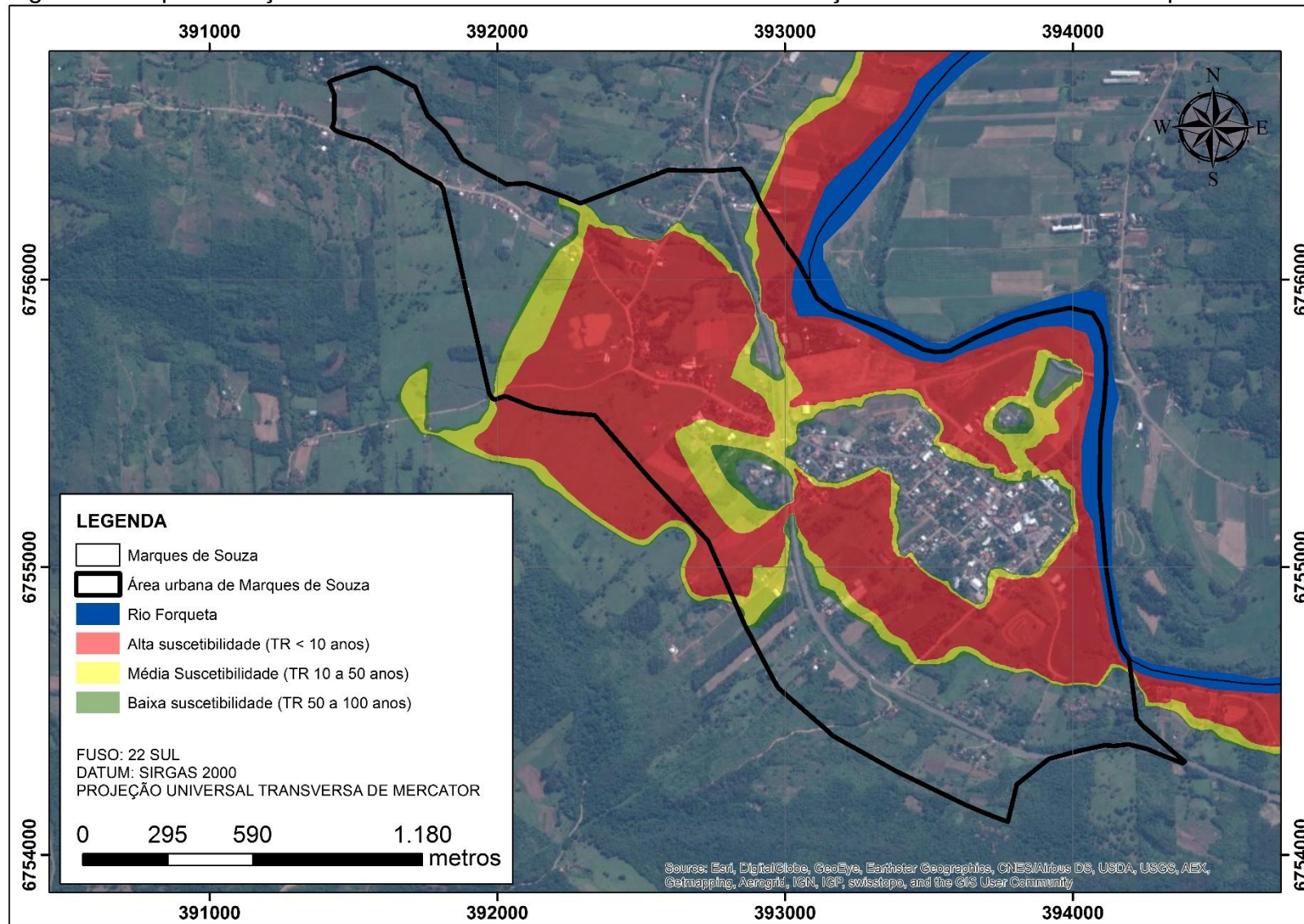


Figura 38: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações em Marques de Souza, RS, no vale do rio Forqueta.



Fonte: Autor (2015).

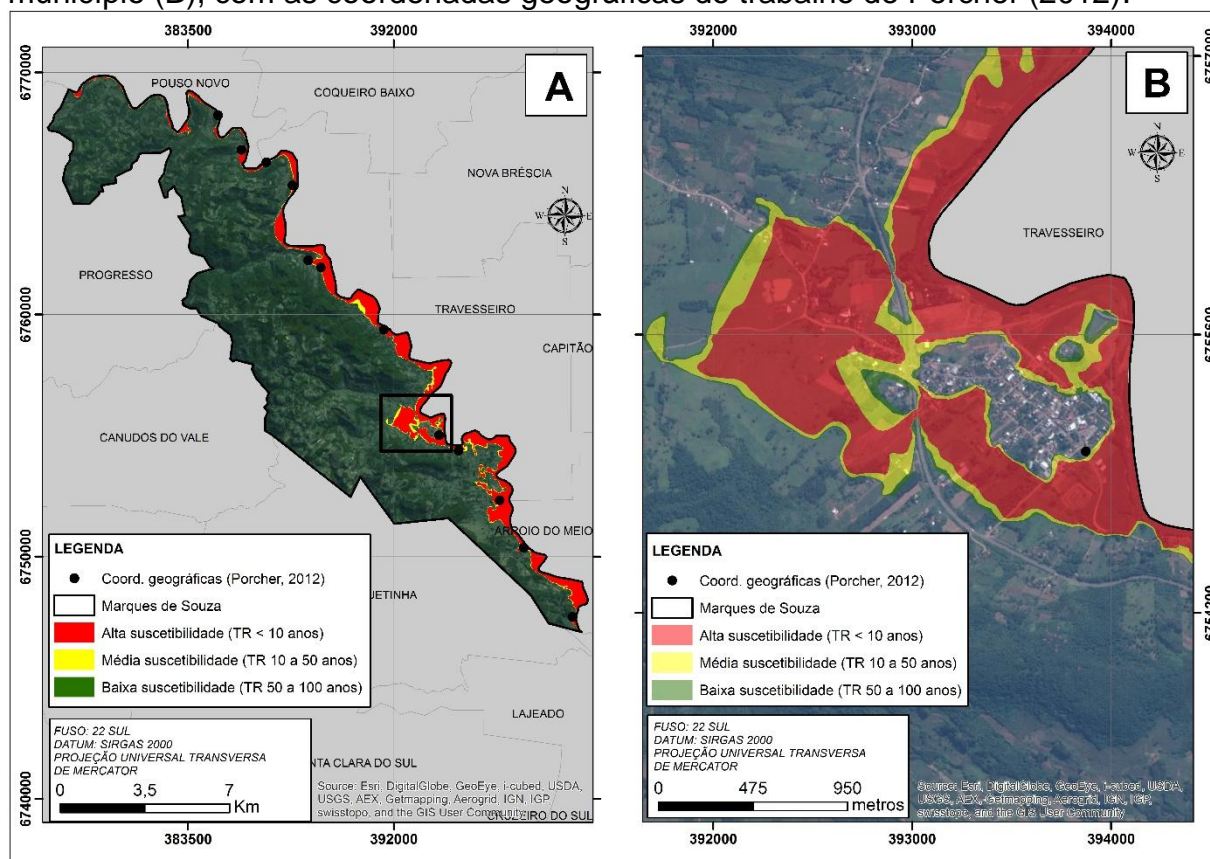
Figura 39: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações da área urbana de Marques de Souza.



Fonte: Autor (2015).



Figura 40: Espacialização das áreas suscetíveis à enxurradas e inundações do município de Marques de Souza (A), com uma aproximação da área urbana do município (B), com as coordenadas geográficas do trabalho de Porcher (2012).

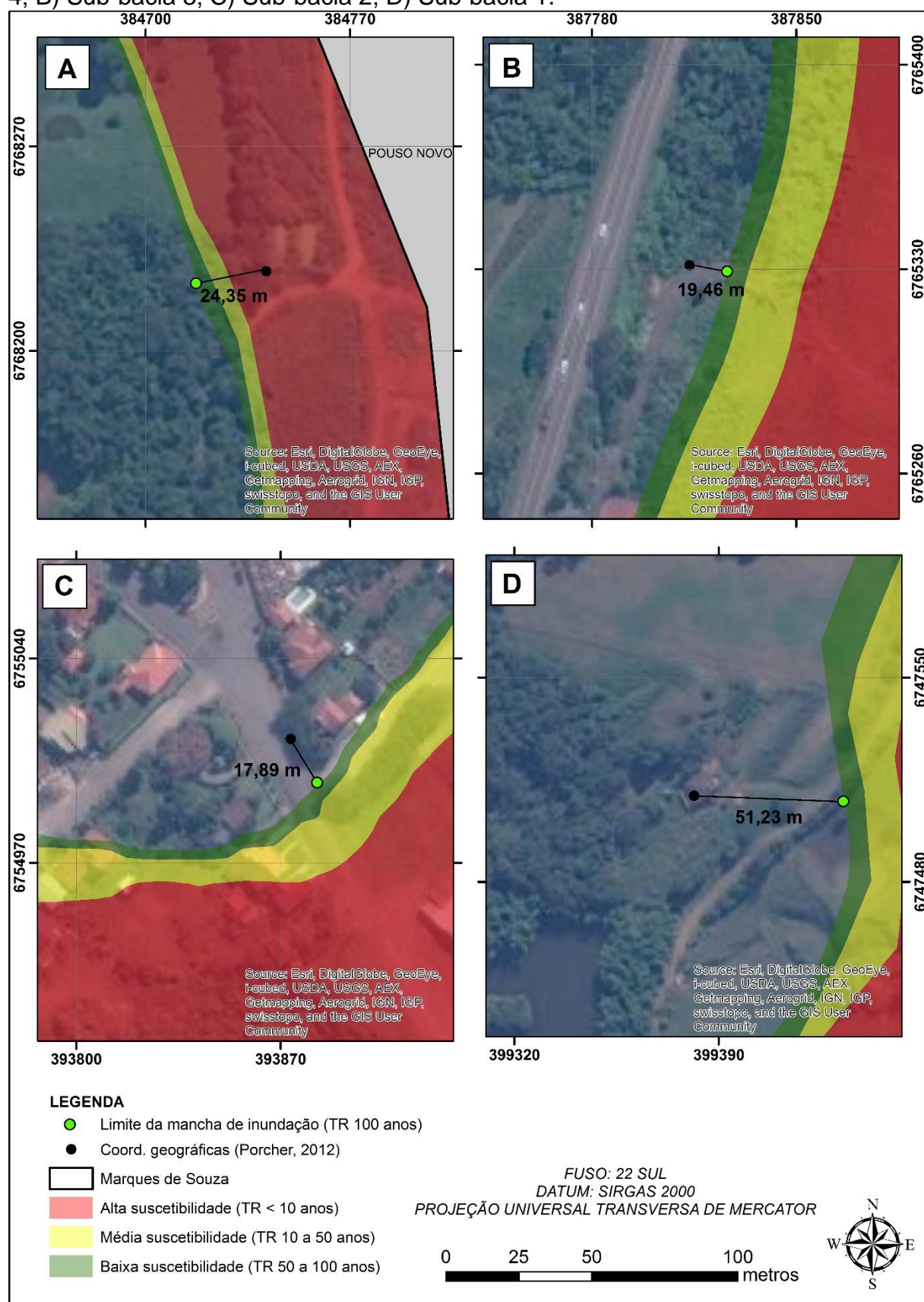


Fonte: Autor (2015).

Analisando as 12 coordenadas geográficas do trabalho de Porcher (2012), verifica-se que seis coordenadas geográficas ficaram dentro da área com TR de 10 anos, duas no TR de 50 anos e quatro fora das áreas com algum grau de suscetibilidade à enxurradas e inundações. Isso demonstra que mesmo com bons resultados, em alguns locais a mancha de inundação estimada para os TRs ficou acima da realidade.

Isso ocorreu, provavelmente por quatro motivos. Primeiramente, deve-se salientar que foi utilizada a equação de chuvas extremas obtida por Sampaio (2011) para a bacia do Taquari-Antas. A bacia é muito extensa, apresentando mais de 26 mil km<sup>2</sup>. Assim, não é possível precisar a equação de chuvas extremas para a bacia do Forqueta, que corresponde apenas a uma fração da bacia do rio Taquari.

Figura 41: Comparação entre as coordenadas geográficas adquiridas do trabalho de Porcher (2012) e as manchas de inundações (TRs 10, 50 e 100 anos). A) Sub-bacia 4; B) Sub-bacia 3; C) Sub-bacia 2; D) Sub-bacia 1.



Fonte: Autor (2015).

Segundo, por se tratar de uma simulação hidrológica, em que é transformada a chuva em vazão, pode haver divergência no resultado gerado no IPHS1 com relação à realidade. O processo de modelagem hidrológica apresenta simplificações tanto na modelagem das sub-bacias quanto na modelagem dos trechos de rio.

Terceiro, o MDE gerado para a área do município, em sua maior extensão, foi obtido a partir de dados da missão SRTM. Esses dados apresentam uma qualidade espacial aplicável para escalas intermediárias, na faixa de 1:100.000, mesmo com o refinamento realizado por Valeriano (2005; 2008).

Por último, as curvas de nível com equidistância de um metro para a área urbana existiam apenas de um lado do rio Forqueta, pois a outra margem do rio pertence ao município de Travesseiro. Dessa forma, para a realização do perfil da planície de inundação de um lado havia dados de alta resolução e do outro eram dados do SRTM.

Ainda assim, deve-se ressaltar que a metodologia adotada pode ser considerada adequada, pois não existem dados hidrológicos disponíveis para a adoção de outros métodos de espacialização das inundações. Além disso, deve-se ressaltar que as manchas de inundação obtidas para diferentes TRs não podem ser precisamente validadas, uma vez que as mesmas não são conhecidas na realidade em virtude da ausência de uma série fluviométrica extensa.

Conforme já mencionado anteriormente, as diferenças verificadas na Figura 41 podem ter ocorrido principalmente pela qualidade dos dados disponíveis para a realização do MDE da área de estudo. Pois, na área urbana, local com curvas de nível com equidistância de um metro, a coordenada geográfica do local que a enxurrada de 04 de janeiro de 2010 atingiu, ficou fora das áreas dos três TRs, conforme esperado, para um evento de tamanha magnitude. Dessa forma, se faz necessário a aquisição de dados de melhor qualidade, principalmente no que se refere as curvas de nível da área total do município para uma melhor espacialização das manchas de inundações. Não se restringindo apenas para a área de Marques de Souza, mas também com parcerias de municípios vizinhos, como por exemplo, Travesseiro, para que se tenha uma qualidade nos dados da calha do rio Forqueta e

também da planície de inundação, pois o rio Forqueta está na divisa dos dois municípios.

#### 4.2 Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa

Conforme relatado no capítulo de métodos, primeiramente realizou-se um inventário dos movimentos de massa. A área de estudo abrangeu as bacias hidrográficas do rio Taquari-Antas, Caí e Sinos, identificando locais de ocorrência de movimentos de massa. O Anexo 1, apresenta as coordenadas geográficas dos 211 movimentos de massa identificados. Desses, 144 estão localizados na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, sendo que 141 na sub-bacia hidrográfica do rio Forqueta, com 137 ocorrências na região do alto rio Fão e quatro na parte baixa da bacia, desses, três no município de Marques de Souza. Na bacia hidrográfica do rio Caí adjacente a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, foram identificadas 55 ocorrências e na bacia hidrográfica do rio do Sinos adjacente a bacia hidrográfica do rio Caí foram identificadas 12 ocorrências.

Para cada movimento de massa, extraiu-se as características físicas, referentes ao uso da terra, tipos de solos, geologia, geomorfologia, desnível do morro, desnível da rampa, orientação do relevo, forma do terreno, declividade, distância das falhas geológicas, distância do sistema viário e distância das linhas de contato litológico. O Quadro 12 apresenta as características físicas dos movimentos de massa para o uso da terra.

Quadro 12: Frequência dos movimentos de massa em relação ao uso da terra.

CLASSES	Nº MOVIMENTOS DE MASSA
Área urbanizada Cidade	1
Lavoura diversificada + Pastagem + Vegetação florestal	9
Pastagem + Lavoura temporária	6
Pastagem + Lavoura temporária + Vegetação florestal	1
Pastagem pecuária bovina	2
Vegetação florestal + Lavoura temporária + Pastagem	10
Vegetação florestal + Pastagem + Lavoura diversificada	182
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Verifica-se que a maioria dos movimentos de massa ocorreram em locais com vegetação florestal, ou seja, 192 ocorrências, equivalente a 91% dos eventos. O Trabalho desenvolvido por Pinto, Passos e Caneparo (2013, pág. 112), citam algumas bibliografias (BIGARELLA et al., 2003; IPT, 1991; GUIDICINE; NIEBLE, 1984) que relatam que áreas com cobertura vegetal são locais menos suscetíveis aos movimentos de massa, pois, “a vegetação atua no sentido de favorecer a estabilidade das encostas, através do esforço mecânico (raízes) e redistribuição da água de chuva, diminuindo e retardando a infiltração desta no terreno, além de protegê-lo contra a erosão”.

Porém, existem algumas controvérsias na literatura científica. O trabalho desenvolvido por Salgado (2013, p. 29), cita bibliografias (PRANDINI et al., 1976; GRAY, 1995; VARGAS, 1999), relatando que a degradação da cobertura vegetal coincide com escorregamentos generalizados das encostas, “mas também há casos observados de grandes escorregamentos deflagrados por chuvas violentas, em regiões cobertas por florestas. Nestes casos, os blocos de rochas carregaram consigo enormes troncos de árvores”. Também menciona, “o efeito alavanca causado pela ação dos ventos, o efeito cunha, pela penetração das raízes em fendas e a sobrecarga vertical devido ao peso da vegetação”.

Dessa forma, no Quadro 12, pode-se constatar que para o presente estudo os movimentos de massa ocorreram quase que em sua totalidade em áreas com vegetação florestal. Devido a isso, não se utilizou a base de uso da terra como uma variável que explicasse os movimentos de massa.

O Quadro 13, apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação aos tipos de solos. A maioria dos eventos ocorreram em solos Litólicos eutróficos, 187 ocorrências, ou 88,63% do total. O Quadro 14, apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação a geomorfologia, verifica-se que a maior parte dos eventos, ocorreram na formação Serra Geral, 149 ocorrências, ou 70,62% do total.

Realizando uma comparação entre essas duas bases, mais precisamente na região do alto rio Fão, local com o maior número de movimentos de massa (137 ocorrências), constata-se que tanto a geomorfologia como os tipos de solos, para a

região do presente estudo, apresentam o mesmo significado referente à suscetibilidade aos movimentos de massa. Isso pode ser melhor entendido analisando a Figura 42, onde elaborou-se um mapa, com a geomorfologia (Serra Geral) sobreposta aos tipos de solos (Litólicos eutróficos), pode-se verificar que as áreas com a presença da formação Serra geral, são basicamente as mesmas com a presença dos solos Litólicos eutróficos. Dessa forma, optou-se por utilizar a geomorfologia como base para o mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa.

Quadro 13: Frequência dos movimentos de massa em relação aos tipos de solos.

<b>TIPOS DE SOLOS</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
Brunizém avermelhado	2
Cambissolo eutrófico	4
Podzólico Vermelho-Amarelo álico	3
Solos Litólicos eutróficos	187
Solos Litólicos Húmicos álicos	3
Terra Bruna Estruturada intermediária para Podzólico Bruno-Acinzentado	9
Terra Roxa Estruturada eutrófica	3
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Quadro 14: Frequência dos movimentos de massa em relação as unidades geomorfológicas.

<b>UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
Campos Gerais	13
Depressão Rio Jacuí	3
Patamares Serra Geral	28
Planície Aluvio-Coluvionar	18
Serra geral	149
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

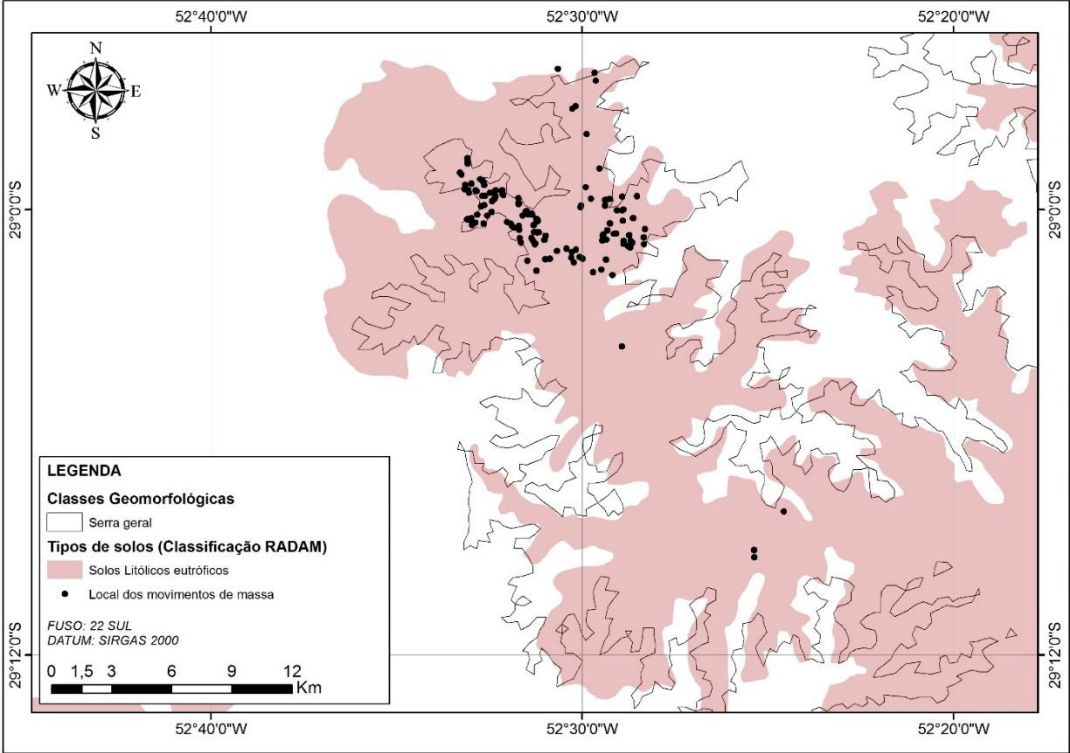
Fonte: Autor (2015).

O Quadro 15 apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação as unidades geológicas. Verifica-se que quase todos os eventos ocorreram nas unidades Fácies Gramado e Caxias, ou seja, 201 ocorrências, desses 43,60% ocorreram nas Fácies Caxias e 51,66% ocorreram nas Fácies Gramado. Verificou-se que os eventos ocorriam próximos da divisa entre as duas Fácies Gramado e Caxias, por este motivo, optou-se por transformar as unidades geológicas em linhas, dessa forma gerando um arquivo com as linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias. Conforme explicado no capítulo de métodos, gerou-se a base de



distância das linhas de contato litológico (Fácies Gramado e Caxias), extraindo as distâncias para cada um dos movimentos de massa, conforme pode ser observado no Quadro 16.

Figura 42: Comparação entre a Geomorfologia e os tipos de solo, região do alto rio Fão.



Fonte: Adaptado CPRM e IBGE (2015).

Percebe-se que um grande número de movimentos de massa (88), ocorrem em distâncias de até 200 metros, representando 41,70% dos eventos. Dividiu-se as distâncias em 12 intervalos, sendo que até os 550 metros encontrava-se a maior parte dos movimentos de massa (138), ou 65,40% do total. O último intervalo (>550m) possui um grande número de ocorrências, porém estão bem distribuídas, em distâncias que varia de 550 a 7400 metros, dessa forma optou-se por unificar em um único intervalo.

Quadro 15: Frequência dos movimentos de massa em relação as unidades geológicas.

UNIDADES GEOLÓGICAS	Nº MOVIMENTOS DE MASSA
Caxias	92
Depósitos Colúvio-Aluviais	3
Formação Botucatu	7
Gramado	109
TOTAL	211

Fonte: Autor (2015).

Os Quadros 17 e 18 apresentam a frequência dos movimentos de massa em relação às distâncias das falhas geológicas e o sistema viário, respectivamente. Percebe-se que no caso das distâncias em relação as falhas geológicas, apenas 30 movimentos de massa (14,22%), ocorreram em distâncias menores que 500 metros. Demonstrando que para os eventos com ocorrência nas bacias hidrográficas do rio Taquari-Antas, rio Caí e rio Sinos a base de distância das falhas geológicas não é indicada como critério para a elaboração do mapa de suscetibilidade.

Quadro 16: Frequência dos movimentos de massa em relação à distância das linhas de contato litológico (Fácies Gramado e Caxias).

<b>INTERVALOS DE DISTÂNCIAS (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0-50	36
50-100	19
100-150	19
150-200	14
200-250	10
250-300	14
300-350	8
350-400	5
400-450	3
450-500	7
500-550	3
>550	73
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Em relação às distâncias para o sistema viário, percebe-se que 123 movimentos de massa (58,29%) ocorreram em distâncias menores que 500 metros. Porém, a distribuição da frequência dos eventos nos intervalos de distâncias é bem distribuída, não apresentando uma relação quanto mais próximo das estradas maior a frequência dos movimentos de massa, dessa forma, a base de distância do sistema viário não é indicada como critério para a elaboração do mapa de suscetibilidade.

Quadro 17: Frequência dos movimentos de massa em relação às distâncias das falhas geológicas.

<b>INTERVALOS DE DISTÂNCIAS (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0-100	3
100-200	11
200-300	6
300-400	6
400-500	4
>500	181
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Quadro 18: Frequência dos movimentos de massa em relação às distâncias do sistema viário.

<b>INTERVALOS DE DISTÂNCIAS (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0-100	25
100-200	18
200-300	27
300-400	32
400-500	21
>500	88
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

O Quadro 19 apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação à orientação do relevo. Percebe-se que não há uma relação clara entre os movimentos de massa e a base de orientação das vertentes. As vertentes com orientações sudeste, oeste, sul e sudoeste, concentram a maior parte dos movimentos de massa (125), representando 59,24% do total.

Fica claro que a orientação das vertentes não determina a ocorrência de movimentos de massa, uma vez que existem rupturas em todas as direções. Trabalhos como de Oliveira (2015) e Paulino (2013), também constataram que os movimentos de massa ocorriam em todas as direções de orientação das vertentes. Desta forma, a base de orientação das vertentes não é indicada como critério para a elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

Quadro 19: Frequência dos movimentos de massa em relação à orientação do relevo.

<b>ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
Norte	23
Nordeste	18
Leste	25
Sudeste	35
Sul	30
Sudoeste	29
Oeste	31
Noroeste	20
	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

O Quadro 20 apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação à forma do terreno. Verifica-se que grande parte dos movimentos de massa (96) ocorrem em curvaturas divergentes, equivalente a 45,50% do total. Na literatura científica (FERNANDES et al., 2001; MIKOSIK; SANTOS, 2011), é comum encontrar

que curvaturas convergentes são mais suscetíveis a movimentos de massa, devido à concentração do fluxo e solos relativamente mais espessos.

Porém, para o presente trabalho isso não ocorre, apenas 27,96% dos movimentos de massa ocorreram em curvaturas convergentes e os outros 26,54% ocorreram em curvaturas planares, dessa forma, a base de forma de terreno não é indicada como critério para a elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

Quadro 20: Frequência dos movimentos de massa em relação à forma do terreno.

<b>FORMAS DO TERRENO</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
Convergente-Côncava	37
Convergente-Retilínea	2
Convergente-Convexa	20
Planar-Côncava	28
Planar-Retilínea	6
Planar-Convexa	22
Divergente-Côncava	33
Divergente-Retilínea	8
Divergente-Convexa	55
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Os Quadro 21 e 22 apresentam a frequência dos movimentos de massa em relação ao desnível do morro e o desnível de rampa. Conforme apresentado no capítulo de métodos, elaborou-se essas bases a partir da altitude dos dados do SRTM. Percebe-se que para o desnível de morro a maioria dos movimentos de massa (163), equivalente a 77,25% do total, ocorrem em intervalos de 150 a 400 metros. Para o desnível de rampa, a maioria dos movimentos de massa (180), equivalente a 85,31%, ocorre em intervalos de 0 a 250 metros.

Verifica-se que nas duas bases a frequência dos movimentos de massa iniciam-se com um valor menor, aumentam até certo intervalo de frequência, e diminuem conforme aumenta o desnível do morro e da rampa. Por este motivo optou-se por utilizar apenas uma das bases, o desnível de rampa, pois tanto a base de desnível de morro como a base de desnível de rampa, tiveram a mesma resposta sobre a suscetibilidade aos movimentos de massa.

A base mais importante para caracterizar os movimentos de massa é a declividade. Pois ela é diretamente proporcional à velocidade do movimento de

massa e, portanto, à capacidade de transporte de solo e de rocha (FERNANDES et al., 2001; DIAS; HERRMANN, 2002), é a base que melhor explica se uma área é suscetível a movimentos de massa.

Quadro 21: Frequência dos movimentos de massa em relação ao desnível do morro.

<b>INTERVALOS DE DESNÍVEL DO MORRO (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0-50	2
50-100	7
100-150	6
150-200	25
200-250	32
250-300	52
300-350	38
350-400	16
400-450	6
450-500	11
500-550	11
550-600	5
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Quadro 22: Frequência dos movimentos de massa em relação ao desnível de rampa.

<b>INTERVALOS DE DESNÍVEL DE RAMPA (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0-50	32
50-100	35
100-150	42
150-200	50
200-250	21
250-300	9
300-350	4
350-400	4
400-450	8
450-500	6
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

O Quadro 23 apresenta a frequência dos movimentos de massa em relação à declividade. Percebe-se que a maioria dos eventos (162), equivalente a 76,78% do total, ocorrem em declividades entre 40 e 85%. Existe a ocorrência de movimentos de massa em declividades menores que 40%, 31 ocorrências, sendo que destas, 7 encontram-se em declividades menores que 20%, consideradas relativamente baixas. Este comportamento resulta em uma razoável dispersão dos valores de

declividades em relação às amostras de movimentos de massa para os 211 eventos amostrais.

Quadro 23: Frequência dos movimentos de massa em relação à declividade.

<b>INTERVALOS DE DECLIVIDADE (%)</b>	<b>Nº DE MOVIMENTOS DE MASSA</b>
0 a 5	2
5 a 10	0
10 a 15	3
15 a 20	2
20 a 25	5
25 a 30	5
30 a 35	5
35 a 40	9
40 a 45	13
45 a 50	22
50 a 55	20
55 a 60	23
60 a 65	20
65 a 70	16
70 a 75	22
75 a 80	13
80 a 85	13
85 a 90	7
90 a 95	4
95 a 100	3
100 a 105	1
105 a 110	0
110 a 115	2
115 a 120	0
120 a 125	1
<b>TOTAL</b>	<b>211</b>

Fonte: Autor (2015).

Realizadas as análises em todas as bases, determinou-se a utilização de quatro delas (declividade, desnível de rampa, geomorfologia e distância das linhas de contato litológico), para a realização do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. Conforme relatado no capítulo de métodos, determinou-se pesos entre 0 e 10 para cada um dos intervalos de cada base, conforme demonstrado nos Quadros 24 a 27.

Quadro 24: Resultado dos pesos para cada intervalo de declividade.

INTERVALOS DE DECLIVIDADE (%)	Nº MOVIMENTOS DE MASSA	FILTRO	%	PESOS
0 a 5	2,00	1,50	0,71	0,69
5 a 10	0,00	1,67	0,79	0,77
10 a 15	3,00	1,67	0,79	0,77
15 a 20	2,00	3,33	1,57	1,54
20 a 25	5,00	4,00	1,89	1,85
25 a 30	5,00	5,00	2,36	2,31
30 a 35	5,00	6,33	2,99	2,92
35 a 40	9,00	9,00	4,25	4,15
40 a 45	13,00	14,67	6,92	6,77
45 a 50	22,00	18,33	8,65	8,46
50 a 55	20,00	21,67	10,23	10,00
55 a 60	23,00	21,00	9,91	9,69
60 a 65	20,00	19,67	9,28	9,08
65 a 70	16,00	19,33	9,13	8,92
70 a 75	22,00	17,00	8,03	7,85
75 a 80	13,00	16,00	7,55	7,38
80 a 85	13,00	11,00	5,19	5,08
85 a 90	7,00	8,00	3,78	3,69
90 a 95	4,00	4,67	2,20	2,15
95 a 100	3,00	2,67	1,26	1,23
100 a 105	1,00	1,33	0,63	0,62
105 a 110	0,00	1,00	0,47	0,46
110 a 115	2,00	1,00	0,47	0,46
115 a 120	0,00	1,00	0,47	0,46
120 a 125	1,00	1,00	0,47	0,46
<b>TOTAL</b>	<b>211,00</b>	<b>211,83</b>	<b>100,00</b>	

Fonte: Autor (2015).

Quadro 25: Resultado dos pesos para cada intervalo de desnível de rampa.

INTERVALOS DESNÍVEL DE RAMPA	Nº MOVIMENTOS DE	FILTRO	%	PESOS
0-50	32,00	32,00	15,21	7,56
50-100	35,00	36,33	17,27	8,58
100-150	42,00	42,33	20,13	10,00
150-200	50,00	37,67	17,91	8,90
200-250	21,00	26,67	12,68	6,30
250-300	9,00	11,33	5,39	2,68
300-350	4,00	6,00	2,85	1,42
350-400	4,00	6,00	2,85	1,42
400-450	8,00	6,00	2,85	1,42
450-500	6,00	6,00	2,85	1,42
<b>TOTAL</b>	<b>211,00</b>	<b>209,33</b>	<b>100,00</b>	

Fonte: Autor (2015).

Quadro 26: Resultado dos pesos para cada intervalo das distâncias das linhas de contato litológico (Fácies Gramado e Caxias).

<b>INTERVALOS DE DISTÂNCIAS (metros)</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>	<b>FILTRO</b>	<b>%</b>	<b>PESOS</b>
0-50	36,00	36,00	25,29	10,00
50-100	19,00	24,67	17,33	6,85
100-150	19,00	17,33	12,18	4,81
150-200	14,00	14,33	10,07	3,98
200-250	10,00	12,67	8,90	3,52
250-300	14,00	10,67	7,49	2,96
300-350	8,00	9,00	6,32	2,50
350-400	5,00	5,33	3,75	1,48
400-450	3,00	5,00	3,51	1,39
450-500	7,00	4,33	3,04	1,20
500-550	3,00	3,00	2,11	0,83
>550	73,00	-	-	0,50
<b>TOTAL</b>	<b>211,00</b>	<b>142,33</b>	<b>100,00</b>	

Fonte: Autor (2015).

Quadro 27: Resultado dos pesos para cada intervalo das unidades geomorfológicas.

<b>UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS</b>	<b>Nº MOVIMENTOS DE MASSA</b>	<b>%</b>	<b>PESOS</b>
Campos Gerais	13,00	6,16	0,87
Depressão Rio Jacuí	3,00	1,42	0,20
Patamares Serra Geral	28,00	13,27	1,88
Planície Aluvio-Coluvionar	18,00	8,53	1,21
Serra geral	149,00	70,62	10,00
<b>TOTAL</b>	<b>211,00</b>	<b>100,00</b>	

Fonte: Autor (2015).

Para as bases de declividade, desnível de rampa e distância das linhas de contato litológico, necessitou-se realizar um filtro de média, conforme demonstrado nos Quadros 24 a 26. Isso foi necessário, pois essas bases apresentaram um comportamento bimodal, já relatado no capítulo de métodos.

A Figura 43 apresenta as bases de declividade, desnível de rampa, distância das linhas de contato litológico e geomorfologia para o município de Marques de Souza. Percebe-se que a base de geomorfologia não apresenta a unidade geomorfológica Depressão rio Jacuí, demonstrada no Quadro 28, isso ocorre, pois, o inventário foi realizado em uma área maior, conforme relatado no capítulo de métodos, e a área de estudo (Marques de Souza) não possui essa unidade geomorfológica.



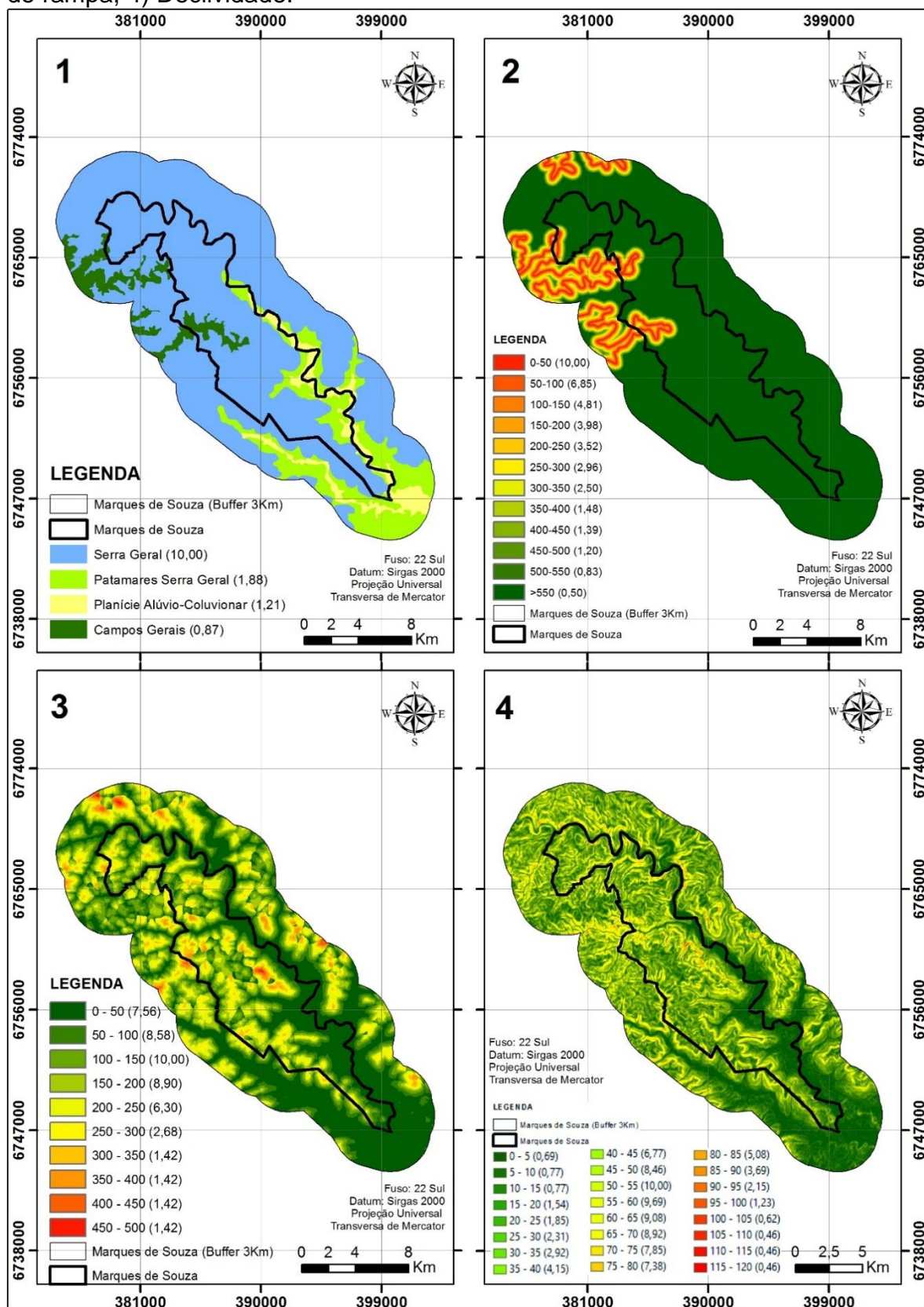
Isso também ocorreu na base de declividade, na área de estudo os intervalos de declividade variam de 0 – 120%, não apresentando o último intervalo de declividade encontrado na realização do inventário que é de 120 – 125%.

Com os pesos determinados para os intervalos de cada base, necessita-se definir a contribuição de cada uma das quatro bases utilizadas, para o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa. Dessa forma, buscando diminuir a subjetividade, foi utilizado o processo analítico hierárquico – *Anaytical Hierarchy Process* (AHP), conforme explicado no capítulo de métodos.

A base com maior importância para os movimentos de massa foi a declividade, conforme já mencionado anteriormente. Dessa forma, montou-se a matriz para a aplicação do método AHP, sempre realizando a comparação em pares, analisando quanto cada base é mais importante que a outra em uma escala de 1 a 9 (Quadro 8). O resultado da aplicação do método AHP para cada base foi o seguinte: a base de declividade recebeu 63%, desnível de rampa 16%, distância das linhas de contato litológico 14% e geomorfologia 7% de importância para a construção do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa (Quadro 28).

Para verificar o IC do método AHP, aplica-se a equação 11 apresentada no capítulo de métodos. O resultado para o presente trabalho foi de um IC igual a 0,02, valor que comprova a consistência da matriz AHP. Silva (2007), cita em seu trabalho a bibliografia de Saaty (1991), onde o autor afirma que para haver consistência no resultado encontrado, o valor deve ser menor que 0,1.

Figura 43: Bases para elaboração do mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa. 1) Geomorfologia; 2) Distância das linhas de contato litológico; 3) Desnível de rampa; 4) Declividade.



Fonte: Autor (2015).

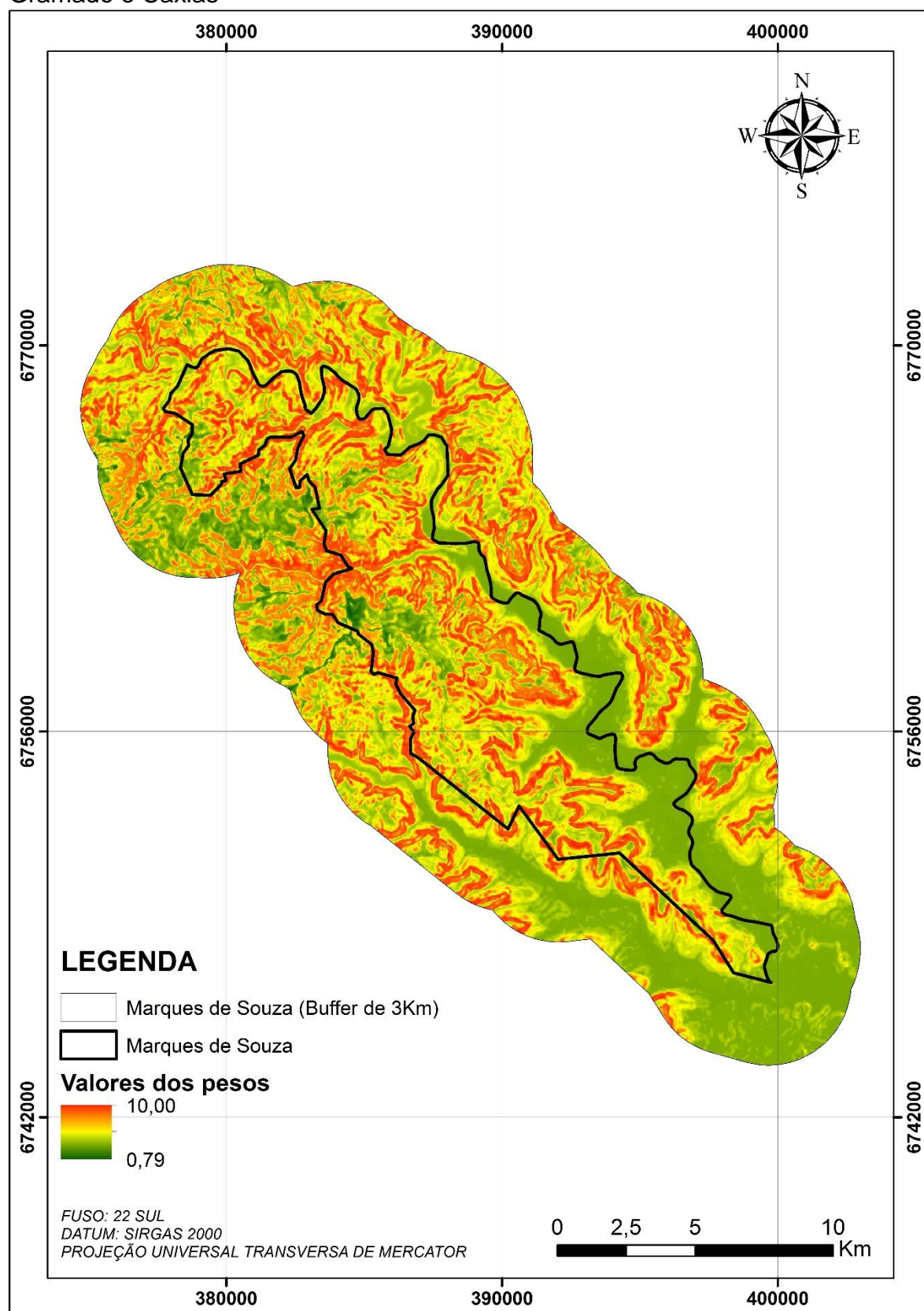
Quadro 28: Matriz de comparação pareada para ponderação das evidências, e determinação dos percentuais de importância de cada base para o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa.

	DECLIVIDADE	DESNÍVEL DE RAMPA	DISTÂNCIA DAS LINHAS DE CONTATO LITOLÓGICO	GEOMORFOLOGIA
DECLIVIDADE	1,00	5,00	5,00	7,00
DESNÍVEL DE RAMPA	0,20	1,00	1,00	3,00
DISTÂNCIA DAS LINHAS DE CONTATO LITOLÓGICO	0,20	1,00	1,00	2,00
GEOMORFOLOGIA	0,14	0,33	0,50	1,00
0,648148148	0,68	0,67	0,54	0,63
0,12962963	0,14	0,13	0,23	0,16
0,12962963	0,14	0,13	0,15	0,14
0,092592593	0,05	0,07	0,08	0,07

Fonte: Autor (2015).

Realizou-se o cruzamento das quatro bases (declividade, desnível de rampa, distância das linhas de contato litológico e geomorfologia), multiplicando cada base pelo percentual de importância encontrado com a realização do método AHP e somando com a próxima base. Dessa forma, gerando o mapa com os valores dos pesos variando entre 0,79 e 10,00, das áreas com menor a maior probabilidade aos movimentos de massa, conforme demonstrado na Figura 44.

Figura 44: Mapa gerado a partir do cruzamento das bases de declividade, desnível de rampa, geomorfologia e distância das linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias



Fonte: Autor (2015).

Para determinar as áreas de baixa, média, alta e sem suscetibilidade, analisou-se a região do alto rio Fão, conforme já mencionado no capítulo de métodos. A Figura 45 apresenta o resultado do cruzamento das quatro bases (declividade, desnível de rampa, distância das linhas de contato litológico e geomorfologia) na região do alto rio Fão, onde foram identificados 137 movimentos de massa. Realizou-se esse processo, para verificar em qual valor de peso iniciavam-se os movimentos de massa nessa região.

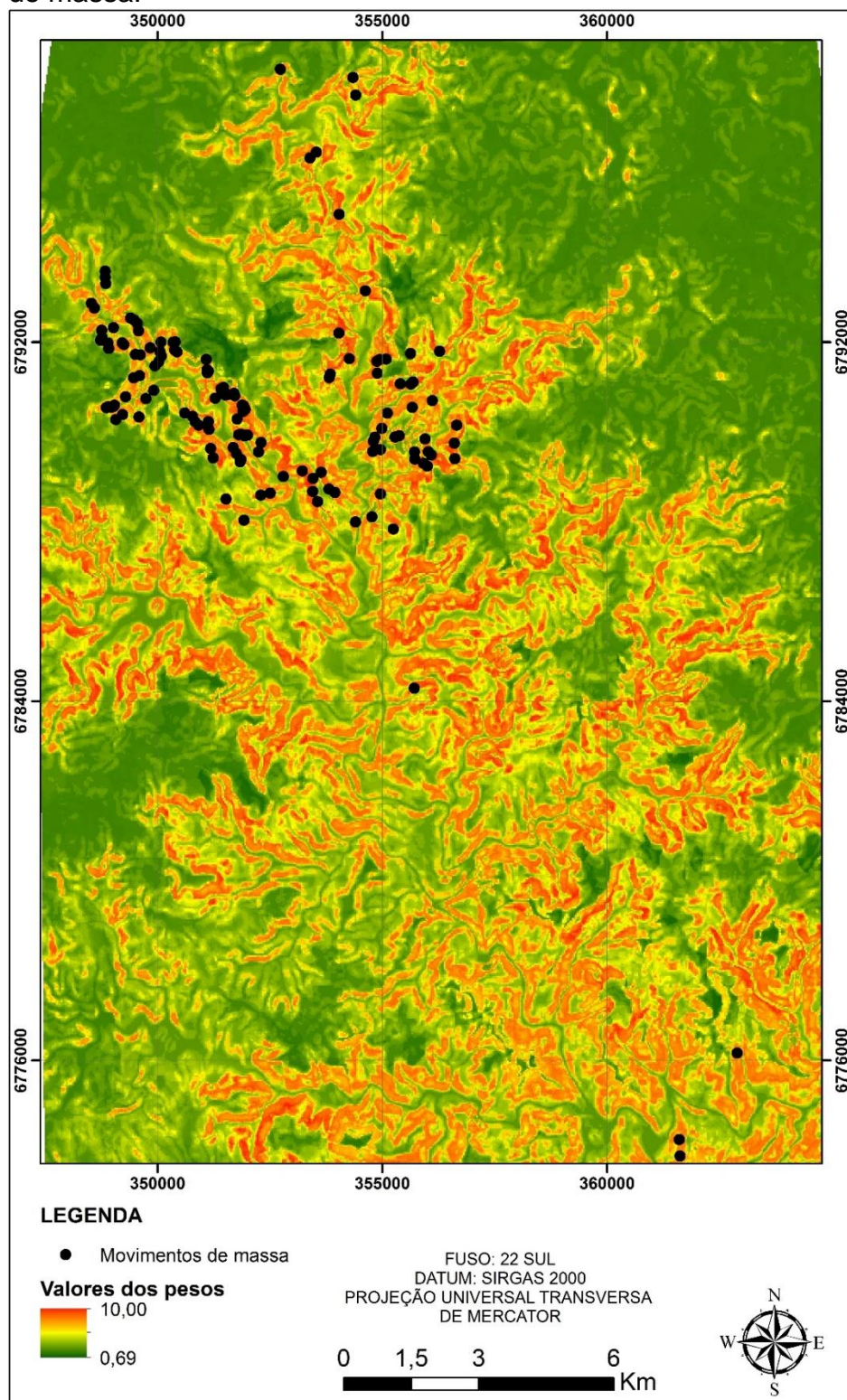
O Quadro 30 apresenta os valores dos pesos em que se iniciaram os movimentos de massa. Para determinar a área sem suscetibilidade verificou-se em qual peso iniciavam-se os eventos, então determinando os locais antes do início das ocorrências como áreas não suscetíveis. Porém, realizando a análise dessa forma, toda a área de Marques de Souza apresentava alguma suscetibilidade, então optou-se por determinar um percentual de omissão de 15% para o início da suscetibilidade. Dessa forma, para os eventos entre 15 e 30% determinou-se como área de baixa suscetibilidade, de 30 a 80% como de média suscetibilidade e maior que 80% como sendo de alta suscetibilidade, conforme demonstrado na Figura 46.

A área do município de Marques de Souza com algum tipo de suscetibilidade aos movimentos de massa é de 9.291,60 hectares, equivalente a 74,10% da área total do município. Desses, 4.815,35 hectares são de baixa suscetibilidade, 2.044,70 hectares de média suscetibilidade e 2.431,54 hectares de alta suscetibilidade, representando 38,40%, 16,31% e 19,39%, respectivamente. A área sem suscetibilidade é de 3.248,10 hectares, equivalente a 25,90% da área do município.

A Figura 47 apresenta a área urbana do município de Marques de Souza com as áreas suscetíveis aos movimentos de massa. Percebe-se que a maior parte da área urbana está fora dos locais com algum grau de suscetibilidade, representando 282,01 hectares, equivalente a 93,42%. As áreas com suscetibilidade representam apenas 19,87 hectares, equivalente a 6,58%, desses 14,21 hectares (4,71%) são de baixa suscetibilidade, 2,48 hectares (0,82%) de média suscetibilidade e 3,18 hectares (1,05%) de alta suscetibilidade.



Figura 45: Mapa gerado a partir do cruzamento dos mapas de declividade, desnível de rampa, distância das linhas onde se encontram as Fácies Gramado e Caxias e geomorfologia, na região do alto rio Fão, onde foram identificados 137 movimentos de massa.



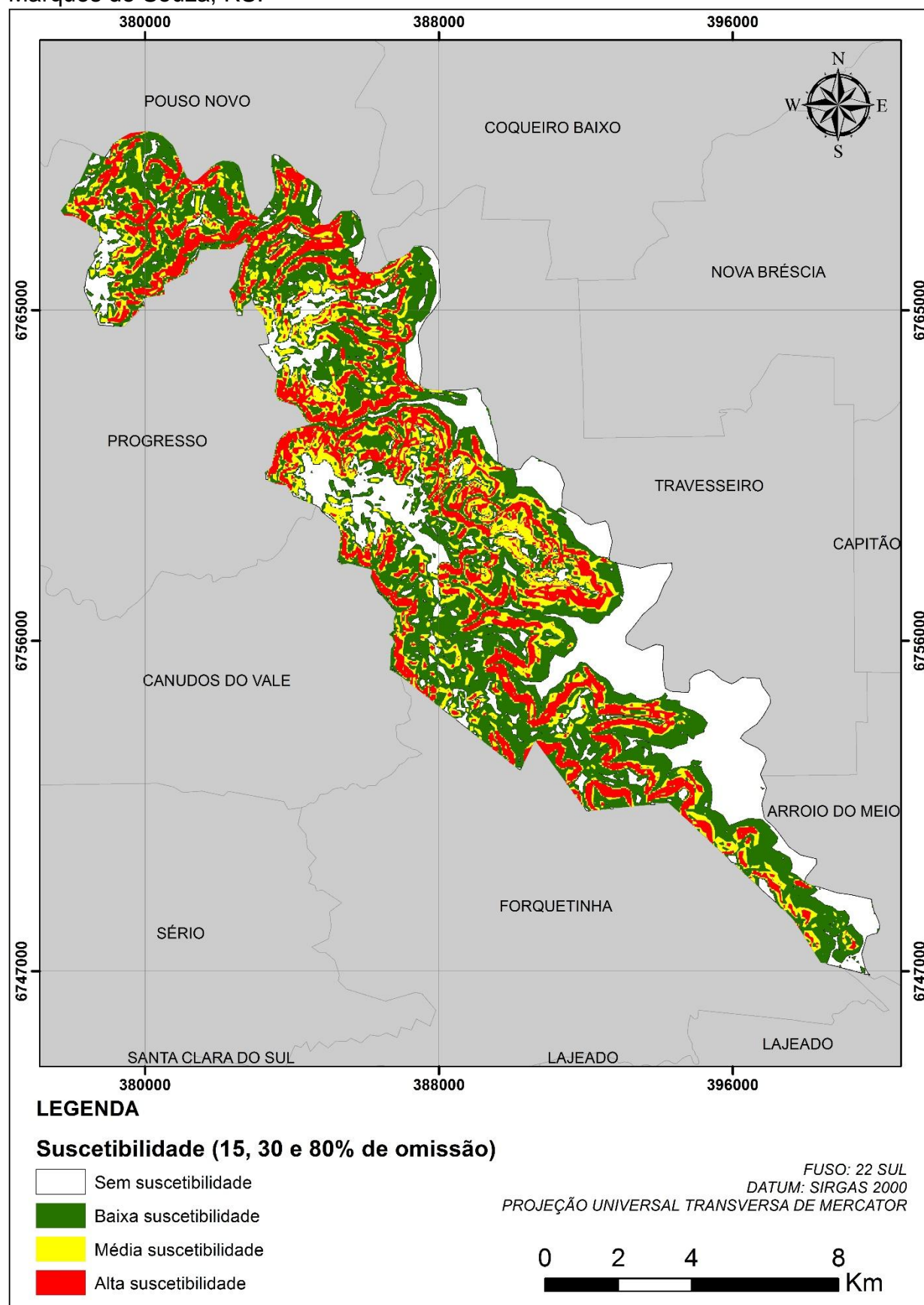
Fonte: Autor (2015).

Quadro 29: Valores dos pesos dos locais com baixa, média, alta e sem suscetibilidade aos movimentos de massa.

Mov. de Massa	Pesos	Mov. de Massa	Pesos	Mov. de Massa	Pesos	Mov. de Massa	Pesos
1	211	37	584	73	760	109	848
2	253	38	584	74	764	110	849
3	294	39	584	75	769	111	849
4	315	40	613	76	769	112	849
5	330	41	624	77	769	113	849
6	359	42	628	78	770	114	851
7	364	43	644	79	774	115	859
8	369	44	660	80	774	116	864
9	372	45	662	81	779	117	867
10	374	46	663	82	780	118	867
11	381	47	672	83	781	119	867
12	384	48	684	84	786	120	867
13	386	49	684	85	786	121	875
14	392	50	694	86	791	122	878
15	398	51	697	87	796	123	887
16	398	52	706	88	798	124	890
17	398	53	707	89	798	125	890
18	400	54	707	90	804	126	897
19	409	55	713	91	809	127	904
20	413	56	713	92	812	128	914
21	420	57	713	93	817	129	924
22	420	58	720	94	818	130	927
23	436	59	730	95	822	131	931
24	446	60	730	96	824	132	936
25	446	61	730	97	827	133	962
26	474	62	730	98	829	134	980
27	489	63	731	99	829	135	982
28	508	64	734	100	833	136	982
29	529	65	743	101	836	137	982
30	534	66	743	102	843		
31	534	67	747	103	844	Suscetibilidade aos movimentos de massa	
32	540	68	751	104	844		
33	541	69	752	105	846		Sem suscetibilidade
34	551	70	757	106	847		Baixa suscetibilidade
35	557	71	757	107	847		Média suscetibilidade
36	564	72	757	108	847		Alta suscetibilidade

Fonte: Autor (2015).

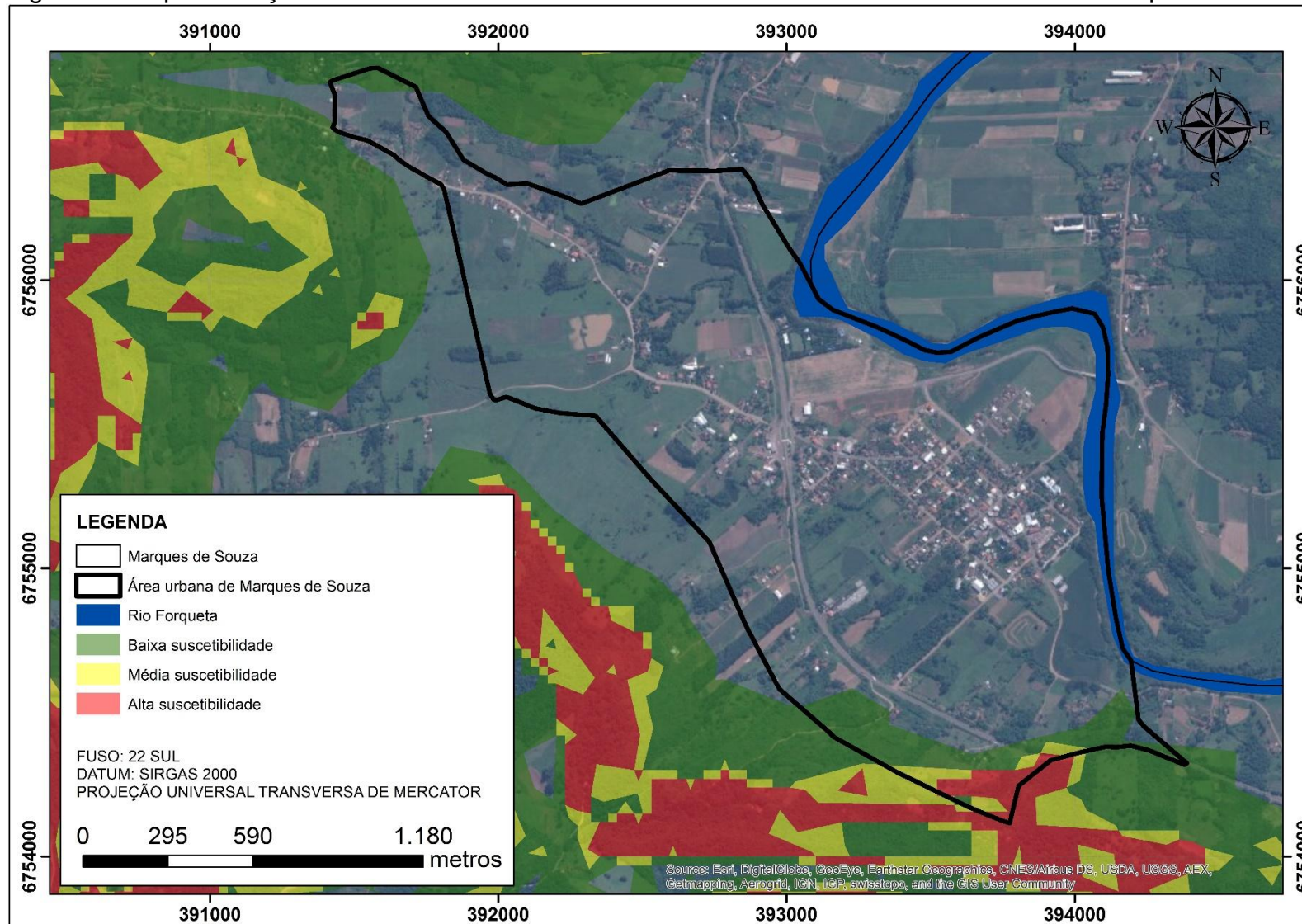
Figura 46: Mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa no município de Marques de Souza, RS.



Fonte: Autor (2015).



Figura 47: Espacialização das áreas suscetíveis à movimentos de massa na área urbana de Marques de Souza.



Fonte: Autor (2015).

### **4.3 Zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação**

Para a elaboração do mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação, realizou-se a união dos mapas de suscetibilidade à enxurradas, inundações e movimentos de massa, conforme apresentado na Figura 48. Vale frisar que estão sendo avaliadas áreas suscetíveis a eventos extremos da natureza, não sendo avaliadas a possibilidade de construções devido a áreas de APP (Área de Preservação Permanente), por exemplo.

A zona 1 são os locais sem suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, nesses locais são permitidos todos os tipos de construções. A área correspondente a essa zona é de 2.083,28 hectares, equivalente a 16,60% da área total do município. Porém, nesses locais é preferível a construção de escolas, creches, hospitais, clínicas e empreendimentos do gênero, por haver uma grande concentração de pessoas, e muitas vezes pessoas mais vulneráveis, o ideal é utilizar essa zona com a ocupação para esses tipos de empreendimentos.

A zona 2 são os locais com baixa suscetibilidade aos movimentos de massa. A área correspondente a essa zona é de 4.669,83 hectares, equivalente a 37,22% da área do município. Nessas áreas recomenda-se a ocupação principalmente de moradias, sugerindo determinada exigência estrutural, principalmente referente aos cortes de talude e com uma boa parede de contenção quando necessário e a posição da casa no terreno (próxima ou distante da crista ou da base dos taludes).

A zona 3 são os locais com baixa suscetibilidade à enxurradas e inundações. A área correspondente a essa zona é de 59,68 hectares, equivalente a 0,48% da área do município. Nessas áreas recomenda-se a ocupação principalmente de moradias, sugerindo determinada exigência estrutural, com estruturas de alvenaria e preferencialmente residências com dois andares.

A zona 4 são os locais com média suscetibilidade aos movimentos de massa. A área correspondente a essa zona é de 2.020,31 hectares, equivalente a 16,10% da área do município. Nessas áreas recomenda-se a ocupação principalmente de

comércios, indústrias e parques, ou moradias com uma determinada exigência estrutural, principalmente referente aos cortes de talude e com uma boa parede de contenção quando necessário.

A zona 5 são os locais com média suscetibilidade à enxurradas e inundações. A área correspondente a essa zona é de 141,67 hectares, equivalente a 1,13% da área do município. Nessas áreas recomenda-se a ocupação principalmente de comércios, indústrias e parques, ou moradias com uma determinada exigência estrutural, como casas com dois pisos, utilizando o primeiro andar apenas para garagem ou depósitos, por serem locais atingidos por enxurradas e inundações.

A zona 6 são os locais com alta suscetibilidade à enxurradas, inundações e movimentos de massa. A área correspondente a essa zona é de 3.572,15 hectares, equivalente a 28,47% da área do município. Por serem áreas de alta suscetibilidade aos eventos extremos da natureza, recomenda-se que nesses locais não seja permitida a construção de novas moradias.

A Figura 49 apresenta um zoom no zoneamento da área urbana do município de Marques de Souza. Analisando a área urbana do município em relação a zona 1, verifica-se que a área pertencente a esta zona é de 107,20 hectares, equivalente a 35,46% da área urbana do município. Porém, desses 35,21 hectares já estão edificadas, equivalente a 32,84%, sendo que boa parte da área também é ocupada para cultivos agrícolas.

A zona 2 em relação a área urbana do município, representa uma área de 14,21 hectares, equivalente a 4,7%. Percebe-se que essa zona ocupa uma pequena parcela, e desses apenas 0,45 hectares estão edificadas, equivalente a 3,2%, localizada em duas regiões, uma ao norte e outra ao sul da área urbana.

A zona 3 em relação a área urbana do município, representa uma área de 9,65 hectares, equivalente a 3,19%. Percebe-se que essa zona da mesma forma que a anterior, ocupa uma pequena parcela, porém possui uma área construída maior que a zona 2, representando 3,18 hectares, equivalente a 32,95% da área considerada de baixa suscetibilidade a enxurradas e inundações.

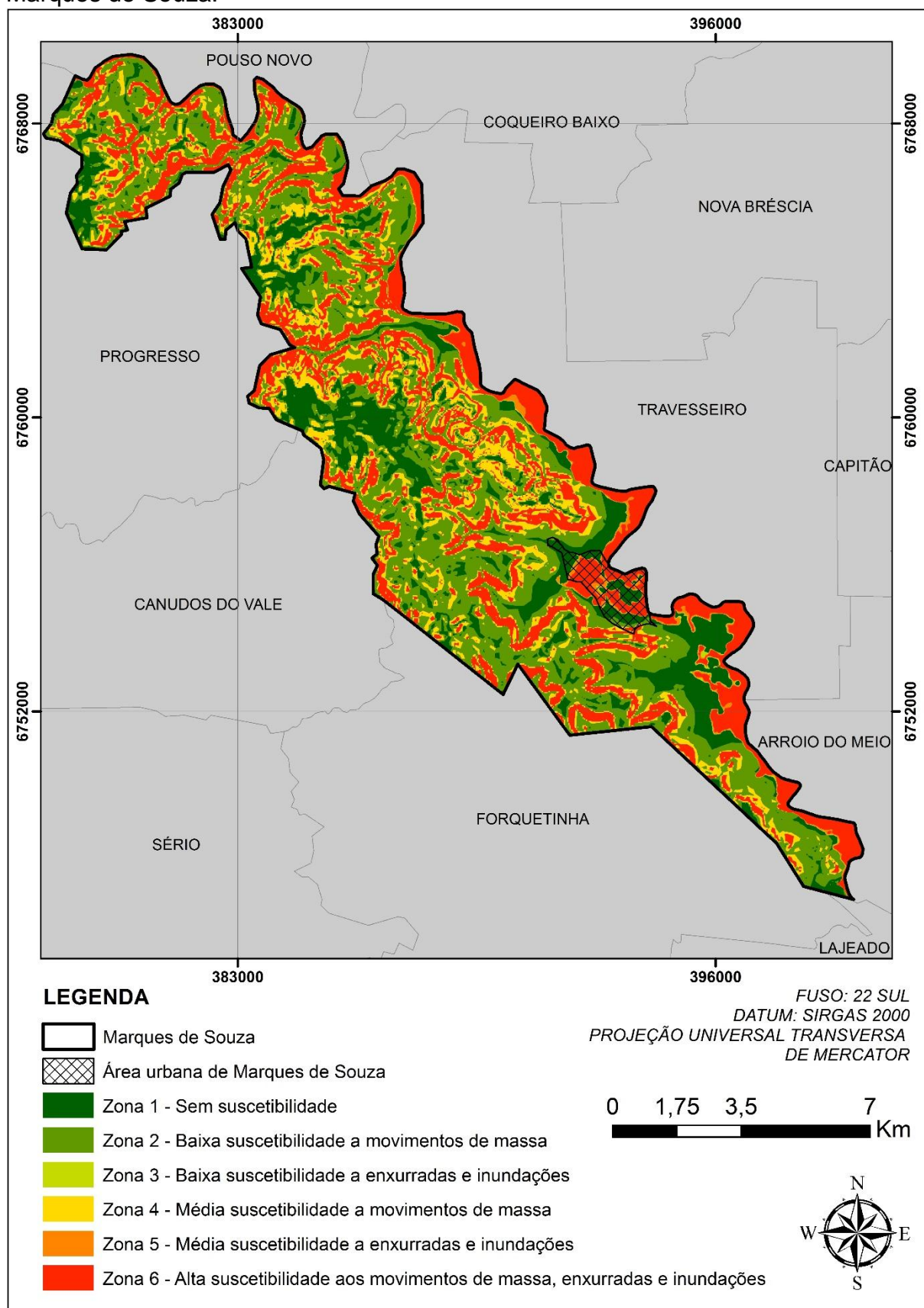
A zona 4 em relação a área urbana do município, representa uma área de 2,48 hectares, equivalente a 0,82%. Localizada ao sul da área urbana, é a zona que ocupa a menor parcela, não possui áreas edificadas nesses locais, sendo ocupada basicamente por agricultura e vegetação.

A zona 5 em relação a área urbana do município, representa uma área de 32,17 hectares, equivalente a 10,64%. Esta zona é a terceira com maior área, com 10,58 hectares de área já edificada, equivalente a 32,89%. Localizada em regiões mais baixas do município, atingidas principalmente por enxurradas e inundações.

A zona 6 em relação a área urbana do município, representa uma área de 136,57 hectares, equivalente a 45,18%. Esta zona ocupa a maior área, porém os locais edificados representam 16,64 hectares, equivalente a 12,18%. Apesar da maior parte não estar ocupada com edificações, o ideal seria que a longo prazo essas áreas já ocupadas fossem desapropriadas e as pessoas remanejadas para locais mais seguros, e mais importante, é evitar que os locais ainda não ocupados sejam utilizados para habitações. Percebe-se que muitos desses locais estão sendo utilizados como áreas para a agricultura, que também não é o ideal, pois caso ocorra alguma inundação, enxurrada ou movimentos de massa, certamente terão perdas econômicas.

Na Figura 49, também foram inseridas três setas que estão indicando os melhores locais para o crescimento da área urbana do município, locais considerados sem suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações. Na Figura 50, analisou-se algumas regiões da área rural do município. Percebe-se que existem algumas edificações pontuais em zonas consideradas de alta suscetibilidade (zona 6). Os mapas A e B estão apresentando edificações em áreas de alta suscetibilidade aos movimentos de massa, e os mapas C e D estão apresentando edificações em áreas de alta suscetibilidade à enxurradas e inundações. Apesar de serem edificações pontuais, é indicado a realização de monitoramentos desses locais, e se possível evitar novas construções em áreas consideradas de alta suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações.

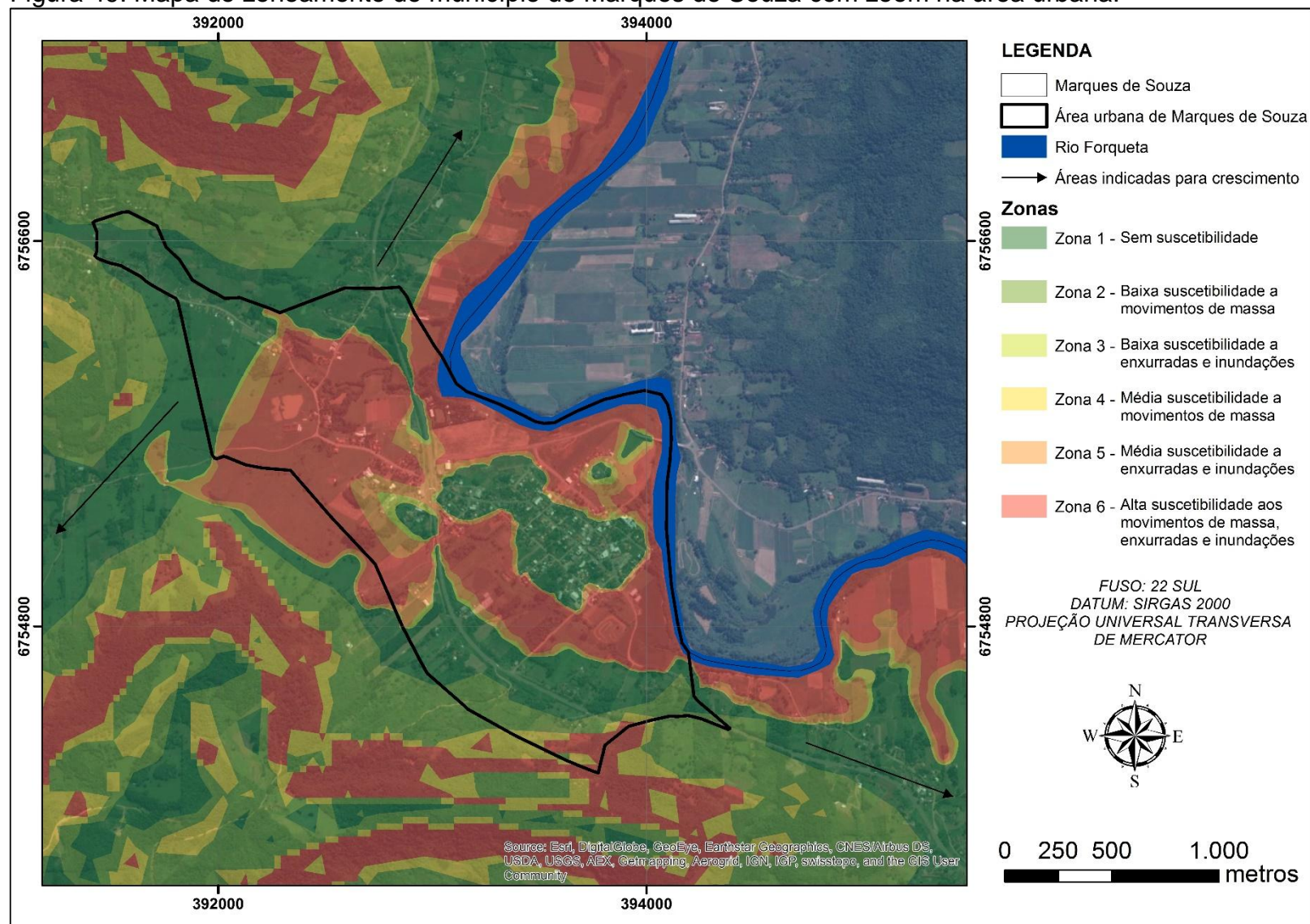
Figura 48: Mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para o município de Marques de Souza.



Fonte: Autor (2015).



Figura 49: Mapa do zoneamento do município de Marques de Souza com zoom na área urbana.

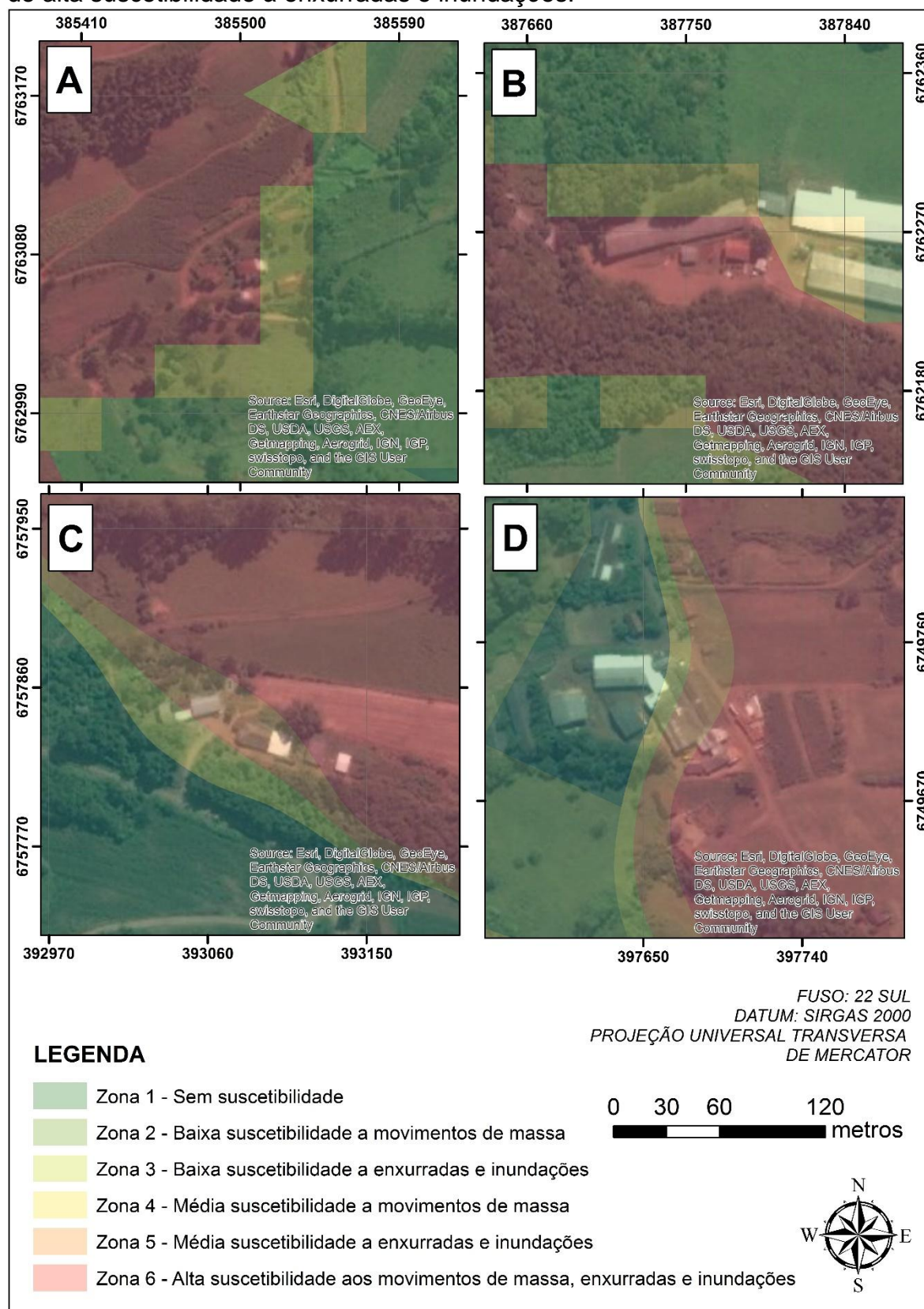


Fonte:

Autor

(2015).

Figura 50: Mapa do zoneamento do município de Marques de Souza, com zoom em algumas regiões na área rural. A e B) Edificações localizadas em áreas de alta suscetibilidade aos movimentos de massa; C e D) Edificações localizadas em áreas de alta suscetibilidade à enxurradas e inundações.



Fonte: Autor (2015).

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais do presente trabalho, bem como sugestões de utilização dos materiais dessa pesquisa pelo poder público na tomada de decisões e no planejamento do desenvolvimento do município.

Os resultados obtidos através da modelagem hidrológica demonstraram-se consistentes e eficientes, através dela permitiu-se a espacialização das manchas de inundações para três cenários (TR 10, 50 e 100 anos), com isso, possibilitando definir as áreas de baixa, média e alta suscetibilidade a enxurradas e inundações no município de Marques de Souza.

Com a espacialização das três manchas de inundações (TR 10, 50 e 100 anos), percebe-se que há pouca diferença entre os TRs de 10 e de 100 anos. Isso se deve às características morfométricas do vale do rio Forqueta, que apresenta vales bastante encaixados, o que faz com que uma precipitação com recorrência de 10 anos já provoque uma cheia com magnitude suficiente para que as águas atinjam os limites da planície de inundação.

A área urbana do município possui 57,96% de sua área com algum grau de suscetibilidade a enxurradas e inundações, sendo que a maior área está situada em locais de alta suscetibilidade, equivalente a 76,13%. Porém, percebe-se que a área do município com maior número de edificações, e consequentemente com maior concentração de pessoas ficou fora das áreas com algum grau de suscetibilidade. A área urbana obteve uma diferença maior entre os TRs, pois, a região onde está



localizada, a planície de inundação é maior, assim, havendo uma maior área para a inundação.

A realização do inventário dos movimentos de massa mostrou-se eficiente, através dele foi possível identificar características físicas de cada um dos eventos e compará-los com as características da área de estudo. Dessa forma, possibilitou-se a geração de um mapa final, através da álgebra de mapas, definindo as áreas de baixa, média e alta suscetibilidade aos movimentos de massa. Os resultados dos movimentos de massa demonstraram que 74,10% das áreas do município encontram-se em locais com algum grau de suscetibilidade, sendo que desses, 38,40% são áreas de baixa, 16,31% de média e 19,39% de alta suscetibilidade.

A área urbana do município possui poucos locais com algum grau de suscetibilidade aos movimentos de massa, apenas 6,58% dos locais. Desses, 4,71% são de baixa suscetibilidade, 0,82% de média suscetibilidade e 1,05% de alta suscetibilidade aos movimentos de massa.

O mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação, elaborado a partir dos mapas de suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, resultou em seis zonas. A zona 1 representou as áreas sem suscetibilidade, permitindo nesses locais o uso para qualquer empreendimento.

As zonas 2 a 5 representam as áreas de baixa e média suscetibilidade, nesses locais sugere-se moradias com determinada exigência estrutural. No caso dos movimentos de massa deve-se cuidar principalmente dos cortes de talude, uma boa parede de contenção quando necessário e a posição da casa no terreno (próxima ou distante da crista ou da base dos taludes). Referente às enxurradas e inundações, recomenda-se a ocupação de edificações com estruturas de alvenaria e preferencialmente residências com dois andares.

A zona 6 representa as áreas de alta suscetibilidade aos movimentos de massa, enxurradas e inundações, recomenda-se que nesses locais não sejam permitidas construções de novas moradias. Também, sugere-se que em longo prazo as habitações presentes nessa zona sejam desapropriadas, e a população realocada em locais sem suscetibilidade a esses eventos.

Através do mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação, o município poderá realizar um estudo de áreas de risco, que possa ser anexado ao plano diretor do município no momento de sua realização. Com isso, poderá desempenhar uma série de ações preventivas, como remoção de pessoas, recuperação de áreas e conservação dos locais suscetíveis a eventos extremos da natureza.

Com o mapa de zoneamento da aptidão do uso do solo para habitação, o poder público pode acrescentar a esse estudo um zoneamento das áreas de APP, também evitando o crescimento do município para esses locais e também um zoneamento dividindo a área do município em regiões comerciais, industriais e habitacional, dessa forma, gerando uma melhor organização para o município.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Rosângela do; RIBEIRO, Rogério Rodrigues. Inundações e enchentes. In: TOMINAGA, Lídia K.; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela do. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. – 196 p. Disponível em: <http://igeologico.sp.gov.br>. Acesso em: 24/04/2015.

BACANI, Vitor Matheus; LUCHIARI, Ailton. **Geoprocessamento aplicado ao zoneamento ambiental da bacia do alto rio Coxim-MS**. GEOUSP – Espaço e Tempo (Online), São Paulo, v. 18, n. 1, p. 184-197, 2014.

BARBOSA, Zileny Nelson Tavares; OLIVEIRA, Wellington Nunes de; ALVES, Paulo Rafael. **Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de riscos Estudo de caso: Angra dos Reis –RJ**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.4941.

BERNARDES, F. F.; SUERTEGARAY, D. M. A. **O Uso de Geotecnologias para o Estudo do Conceito de (Meio) Ambiente no Ensino Médio. Geografia: Ensino & Pesquisa**. Santa Maria, v. 13, n. 2, julho de 2009.

BERNARDI, José Vicente Elias; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 10, 31 pp. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 06/05/2015.

BERTONI, Juan C.; TUCCI, Carlos E. M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ANRH, 2013. Cap. 5, p. 177-242.

BRESSANI, Luiz Antonio. Geotecnia aplicada à prevenção de desastres. In: GUASSELLI, Laurindo Antonio; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; ALVES, Rita de Cássia Marques. **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. Porto Alegre: Evangraf, 2013, 208 p.

CARVALHO, Rafael Marques de. **TOMADA DE DECISÃO PELO MÉTODO AHP: Escolha de churrascarias rodízios em Brasília com base em atributos de preferência dos clientes.** Monografia apresentada ao Departamento de Administração de de Administração como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Administração. Universidade de Brasília. Brasília, DF, Brasil, 2011.

CASAGRANDE, Catia Andersen. **Diagnóstico ambiental e análise temporal da adequabilidade do uso e cobertura do solo na Bacia do Ribeirão dos Marins, Piracicaba, SP.** Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agro ecossistemas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CASTRO, A. L. C. (coord.). **Glossário de Defesa Civil Estudos e Medicina de Desastres.** Ministério da Integração Nacional de Defesa Civil – SEDEC. 5ª edição. Brasília, 2009.

CEPED, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012.** Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2 ed. rev. ampl. – Florianópolis: UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 2013. 126p.

CERVANTES, Luan Moreno Silva. **Análise de risco a escorregamentos do município do rio de janeiro: geração de informações pedogeotécnicas e pluviométricas georeferenciadas.** Rio de Janeiro, PUC-RIO, 2013. Disponível em: [http://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2008/relatorios/ctc/civ/eng\\_civil3.pdf](http://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2008/relatorios/ctc/civ/eng_civil3.pdf). Acesso em: 06/05/2015.

DA CAS, Rodrigo. **Estudo da influência da PCH Salto Forqueta na enchente de 04 de janeiro de 2010.** Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. 2015. Não publicado.

DEFESA CIVIL. **Avaliação de danos do município de Marques de Souza.** 04/01/2010.

DIAS, Fernando Peres; HERRMANN, Maria Lúcia de Paula. **SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS: ESTUDO DE CASO NO BAIRRO SACO GRANDE, FLORIANÓPOLIS – SC.** Caminhos de Geografia 3(6), Jun/2002.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas a Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado/RS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

EM – DAT, The International Disaster Database. Disponível em: <http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>. Acesso em: 10/05/15.

FERNANDES, Nelson F.; GUIMARÃES, Renato F.; GOMES, Roberto A. T.; VIEIRA, Bianca C.; MONTGOMERY, David R.; GREENBERG, Harvey. **Condicionantes geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, Volume 2, Nº 1 (2001) 51-71.

FERREIRA, Aline Batista; FILHO, Waterloo Pereira. **Análise do Uso e Cobertura da Terra de Três Sub Bacias Hidrográficas – Rio Grande do Sul/Brasil**. RBGF – RBGF – Revista Brasileira de Geografia e Física, Recife, v. 2 n. 03, p. 20-36, set/dez, 2009. Acesso em: <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/view/63/53>. Acesso em: 06/05/2015.

FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Conab, 2005. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/>. Acesso em: 05/05/2015.

FRANCO, Maria de Assuncao Ribeiro. **Planejamento ambiental para a cidade sustentável**. 2. ed. São Paulo: Annablume, 2001.

GUASSELLI, Laurindo Antonio; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; QUEVEDO, Renata Pacheco; BRUBACHER, João Paulo. **Modelagem hidrológica e espacialização de áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS**. Revista de Geografia da UERJ (GEOUERJ), 2015. Não publicado.

GUIMARÃES, Renato Fontes; JÚNIOR, Osmar Abílio de Carvalho; GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso; FERNANDES, Nelson Ferreira. Movimento de Massa. In: FLORENZANO, Teresa Gallotti (Org.). **GEOMORFOLOGIA: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GUMBEL, E. J. 1958. Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, 375p.

Hasenack, Heinrich; Weber, Eliseu. (org.). **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

HOFF, Rosemary; DUCATI, Jorge Ricardo; COUTINHO, André Luis Silva; TONIETTO, Jorge. **Uso de imagens orbitais no estudo das características espectrais das rochas para o estabelecimento de critérios para uma indicação de procedência vinícola na região de Pinto Bandeira, Bento Gonçalves, RS, Brasil**. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 233-240.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/1E9I>. Acesso em: 27/03/2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2007.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações automáticas – gráficos.** Disponível em: [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf). Acesso em: 25/05/2015.

JENSEN, J. R., 1949, **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma Perspectiva em Recursos Terrestres.** São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KEIFER, C. J.; CHU, H. H. Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. Journal of the Hydraulics Division, 83, H Y 5, 1957. p. 1332-1/1332-25.

KIRPICH, Z.P. 1940. **Time of concentration in small agricultural watersheds.** Civil Engineering, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.

KOBIYAMA, Masato; MENDONÇA, Magaly; MORENO, Davis Anderson; MARCELINO, Isabela P. V. de Oliveira; MARCELINO, Emerson V.; GONÇALVES, Edson F.; BRAZETTI, Letícia Luiza Penteado; GOERL, Roberto Fabris; MOLLERI, Gustavo Souto Fontes; RUDORFF, Frederico de Moraes. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos.** Curitiba: Ed. Organic Trading , 2006. 109p. : il., tabs. Inclui bibliografia. ISBN – 85-87755-03-X.

MARCELINO, Emerson Vieira. **Desastres Naturais e Geotecnologias: conceitos básicos.** Santa Maria, RS, Brasil. Janeiro de 2008.

MARTINS, Patrícia de A. **Mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos no perímetro urbano de Igrejinha – RS.** Dissertação (Mestrado de Pós-Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/86449>. Acesso em: 06/02/2015.

MENEZES, Daniel Junges. **ZONEAMENTO DAS ÁREAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DE SANTA CRUZ DO SUL – RS.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências) - Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2014. 137 p.

MIKOSIK, Ana Paula Marés; SANTOS, Leonardo José Cordeiro. **CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS INDUTORAS DE ESCORREGAMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAGRADO (MORRETES/PR).** Anais XIV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Dourados/MG – 11 a 16 de julho de 2011.

MORAES, Indiara Bruna Costa Moura; RIBEIRO, Gilberto Pessanha; LARENTIS, Dante Gama. **Sistema De Informação Geográfica (SIG) aplicado ao mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamento no município de Angra Dos Reis-RJ.** IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 06- 09 de maio de 2012. p. 001 – 006.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 3ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. 320 p.

MUNICÍPIO DE MARQUES DE SOUZA. **Mapa de inundações: 2007 e 2010.** Data da elaboração 04 de março de 2010.

NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de. **Modelos para Previsão, Espacialização e Análise das Áreas Inundáveis da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; SALDANHA, Dejanira Luderitz; GUASSELLI, Laurindo Antonio. **Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; GUASSELLI, Laurindo Antonio; BRUBACHER, João Paulo; SIRANGELO, Fabiana Rauber. **Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de. **Suscetibilidade a corridas de detritos na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas**. 2015. Não publicado.

PAULINO, Rafael Bendo. **Modelo AHP aplicado à ocorrência de deslizamentos na região nordeste de Santa Catarina**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia. Paraná: Curitiba, 2013.

PINTO, Roberto Carlos; PASSOS, Everton; CANEPARO, Sony Cortese. **Considerações a respeito dos condicionantes utilizados em pesquisas envolvendo movimentos de massa**. Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Maringá, v. 5, n. 1, p. 102-124, 2013.

PORCHER, Paulo Souza. **Delimitação de áreas de vulnerabilidade a deslizamentos e inundação com o uso de geotecnologias no município de Marques de Souza - RS**. 2012. 52 f. f. Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Ambiental, do Centro Universitário Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

PRESS, Frank et al. **Para entender a terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João Vianeí. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Relatório Técnico Parcial, INPE, 2007.

RIFFEL, Eduardo Samuel; GUASSELLI, Laurindo Antonio. Mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Paranhana, RS. In: GUASSELLI, Laurindo Antonio; OLIVEIRA, Guilherme Garcia de; ALVES, Rita de Cássia Marques. **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. Porto Alegre: Evangraf, 2013, 208 p.

ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; TRENTIN, Romario. (Org.). **Desastres naturais no Rio Grande do Sul**. Editora UFSM, Santa Maria, 2013. 496 p.

ROSA, Roberto. **Geotecnologias na Geografia Aplicada**. *Revista do Departamento de Geografia*. Uberlândia, out. 2005, p. 81-90.

SALGADO, Jamile Constança Rocha Santos Soutelo. **Avaliação e modelação da suscetibilidade a movimentos de vertente superficiais translativos em Nova Friburgo**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2013.

SAMPAIO, Marcela Vilar. **Determinação e espacialização das equações de chuvas intensas em bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul**. Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Santa Maria, RS, Brasil, 2011.

SANTOS, Rozely F. dos. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 192 p.

SANTOS, Rozely F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SILVA, Diva Martins Rosas e. **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. Dissertação de mestrado apresentada como requisito para obtenção de título de mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SILVA, J. X. **O que é Geoprocessamento?**. Rio de Janeiro – RJ: Revista do CREARJ, 2009.

SOUZA, Alexandre dos Santos; FURRIER, Max; VALADARES, Diego Nunes; NÓBREGA, Wesley Ramos; SANTOS, Aparecida D. Garcia dos. **A GEOMORFOLOGIA: UMA REFLEXÃO CONCEITUAL**. *Cadernos do Logepa*. v. 8, n. 1-2, p. 37-53, jan./dez. 2013.

TOMINAGA, Lídia K.; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. – 196 p. Disponível em: <http://igeologico.sp.gov.br>. Acesso em: 24/04/2015.

TUCCI, Carlos E. M. Água no Meio Urbano. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (org) **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006. Cap. 12.



TUCCI, Carlos E. M. Controle de enchentes. In: **Hidrologia: ciência e aplicação**. TUCI, Carlos E. M. (Org). 4 ed., Porto Alegre, Ed. Da UFRGS/ABRH, 2013.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, J. C. (Org). **Inundações urbanas da América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, Carlos E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).

TRENTIN, Romario; BAZZAN, Thiago. O uso de geotecnologias para análise de áreas de risco e desastres naturais. In: ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; TRENTIN, Romario. **Desastres Naturais no Rio Grande do Sul**. Editora UFSM, Santa Maria, 2013. 496 p.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, GO. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 1-8.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: Tereza G Florenzano. (Org.). **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. 1 ed. v.1, São Paulo: Oficina de textos, 2008.

VEDOVELLO, Ricardo; MACEDO, Eduardo Soares de. Deslizamentos de Encostas. In: SANTOS, Rozely Ferreira dos (Org). **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007.192 p.

ZANETTI, Sidney Sára. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul**. Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal – 2007. 135 f.

Anexo 1: Coordenadas geográficas dos movimentos de massa (Mov. De massa).  
Zona 22 Sul, Datum Sirgas 2000 e Projeção Universal Transversa de Mercator.

Mov. de massa	Longitude	Latitude	Mov. de massa	Longitude	Latitude	Mov. de massa	Longitude	Latitude
1	370066	6744457	72	353638	6789097	142	349251	6791943
2	466108	6738612	73	353224	6789131	143	348733	6792039
3	515323	6730226	74	352800	6789006	144	348767	6792102
4	521155	6732199	75	352299	6788593	145	348755	6792259
5	522783	6732305	76	352505	6788634	146	349582	6792249
6	518531	6729157	77	351924	6788032	147	349548	6792418
7	520286	6727778	78	351523	6788503	148	349484	6792486
8	520132	6727778	79	351840	6789334	149	349403	6792534
9	518848	6729951	80	351754	6789517	150	348596	6792756
10	522181	6728065	81	351856	6789384	151	348528	6792863
11	518242	6727929	82	352248	6789553	152	349020	6792318
12	518603	6727221	83	352307	6789761	153	348849	6793301
13	518335	6728983	84	351685	6789650	154	348837	6793440
14	521078	6731746	85	351239	6789419	155	348836	6793575
15	376742	6754613	86	351183	6789627	156	465745	6754928
16	391661	6756704	87	352005	6789925	157	461282	6756493
17	389631	6756522	88	351939	6789906	158	463027	6754683
18	392295	6754204	89	351810	6789936	159	468392	6753454
19	352732	6798072	90	351856	6789942	160	468437	6753728
20	354347	6797893	91	351925	6789925	161	468068	6753305
21	354411	6797501	92	351133	6790229	162	468370	6753410
22	353534	6796229	93	351145	6790056	163	468091	6752772
23	353393	6796098	94	350916	6790148	164	469365	6751932
24	354041	6794844	95	350837	6790222	165	465153	6755882
25	354624	6793139	96	350780	6790343	166	466039	6755056
26	354037	6792197	97	350609	6790420	167	463450	6753825
27	354269	6791630	98	351772	6790285	168	469264	6751571
28	354879	6791573	99	351901	6790453	169	463734	6754352
29	354941	6791607	100	351951	6790501	170	461350	6754303
30	355084	6791620	101	351913	6790580	171	464618	6753483
31	353846	6791287	102	351883	6790593	172	464570	6753677
32	353820	6791208	103	351719	6790802	173	465990	6754433
33	354890	6791303	104	351702	6790856	174	462802	6755636
34	355402	6791067	105	351553	6790830	175	462021	6756924
35	355637	6791063	106	351506	6790821	176	462745	6755420
36	355686	6791108	107	351472	6790987	177	465019	6755628
37	355627	6791745	108	351411	6790956	178	465792	6754381
38	356275	6791793	109	351285	6790750	179	464996	6755448
39	356115	6790695	110	351087	6791610	180	465666	6754942
40	355670	6790546	111	351102	6791378	181	461984	6755348
41	355114	6790416	112	351134	6791354	182	466130	6753999

Mov. de massa	Longitude	Latitude	Mov. de massa	Longitude	Latitude	Mov. de massa	Longitude	Latitude
42	356654	6790148	113	351111	6791313	183	461269	6754256
43	356603	6789750	114	348864	6790540	184	462309	6754595
44	355953	6789841	115	348898	6790556	185	463056	6754916
45	356615	6789399	116	348971	6790546	186	463116	6754505
46	356089	6789485	117	349021	6790565	187	465863	6754749
47	356025	6789556	118	349041	6790591	188	465327	6756232
48	356002	6789237	119	349072	6790274	189	464373	6752958
49	355916	6789298	120	349223	6790382	190	465970	6754001
50	355725	6789394	121	349589	6790330	191	462374	6754366
51	355377	6789912	122	349291	6790778	192	468352	6753722
52	355718	6789551	123	349740	6790739	193	460908	6754362
53	355287	6789886	124	349920	6790923	194	460555	6754856
54	354787	6789559	125	349604	6791252	195	468332	6753285
55	354959	6789607	126	349468	6791204	196	468394	6753733
56	354802	6789791	127	350435	6791782	197	468827	6752044
57	354838	6789880	128	350387	6791822	198	468956	6753243
58	354994	6790077	129	350087	6791686	199	468942	6753120
59	354963	6788618	130	350057	6791786	200	468449	6753570
60	354770	6788106	131	350394	6792002	201	465643	6754112
61	354405	6787990	132	350348	6791994	202	466010	6754718
62	355247	6787837	133	350079	6791998	203	466213	6754601
63	362894	6776165	134	350029	6791563	204	468068	6752674
64	361606	6774240	135	349943	6791469	205	468207	6753064
65	361622	6773876	136	349614	6791714	206	465909	6753993
66	355712	6784291	137	349509	6791724	207	466605	6754554
67	353559	6788444	138	349840	6791871	208	468203	6752749
68	353455	6788673	139	348919	6791856	209	468266	6753203
69	353946	6788649	140	348900	6791978	210	370466	6744555
70	353814	6788725	141	349213	6791982	211	553723	6807543
71	353457	6788962						

Fonte: Autor (2015).